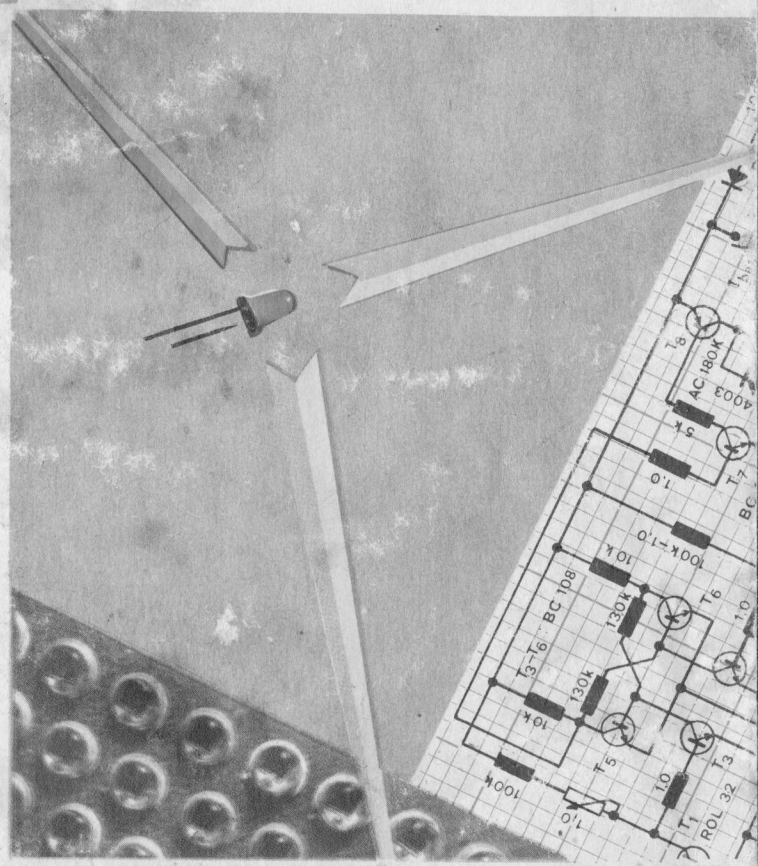
COLECȚIA LYCEUM

LYCEUM

MIRCEA NEGREANU
GHEORGHE BĂLUȚĂ

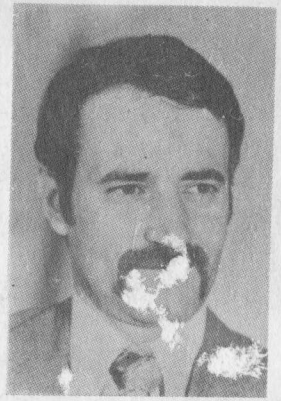
# De la efectul fotoelectric la celula solară

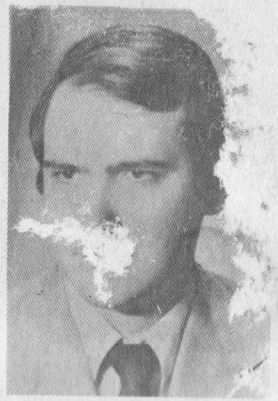



EDITURA ALBATROS

COLECȚIA LYCEUM

Lei 5





Efectul fotoelectric, fenomen a cărui explicare a condus la înțelegerea naturii luminii, stă la baza construirii dispozitivelor optoelectronice, de la celula fotoelectrică la celula solară. Dispozitivele optoelectronice moderne, realizate pe materiale semiconductoare, și-au făcut apariția cu aproximativ 25 de ani în urmă, ele devenind elemente esențiale ale unor domenii variate — automatizări, afișarea datelor, comunicații optice etc. Lucrarea de față facilitează înțelegerea funcționării acestor dispozitive, prezintă principalele lor aplicații și dă posibilitate constructorilor amatori să experimenteze o serie de montaje cu aplicabilitate imediată.

Progresul tehnic din secolul nostru face ca unele lucruri ce pînă nu demult erau de domeniul fanteziei să devină azi realitate, iar peste cîțiva ani să pară simple și banale. Iată cîteva exemple.

Puțini dintre spectatorii cinematografelor știu că filmul sonor, care azi este unul din cele mai obișnuite lucruri, a apărut de-abia după înțelegerea efectului fotoelectric extern și construirea celulelor fotoelectrice. Și mai puțini știu că la ora actuală pista sonoră a filmelor este „citită" cu celule fotovoltaice semiconductoare, mai mici, mai fiabile și mai economice decît cele fotoelectrice.

Sîntem obișnuiți cu ideea alimentării electrice de la baterii solare nu numai a îndepărtatelor nave cosmice și sateliți artificiali ai Pămîntului, dar și a ceasurilor electronice de mînă.

Ni se pare că există „de cînd lumea" calculatoare de cele mai diverse tipuri, ale căror cifre roșii, verzi sau galbene afișează luminos datele care ne interesează.

Am numit mai sus cîteva componente — celule fotoelectrice și fotovoltaice, baterii solare, afișaje cu diode electroluminescente — din familia largă a dispozitivelor optoelectronice. Ele sînt creații destul de recente ale inventivității umane, care s-au integrat organic în viața cotidiană și mulți dintre noi trecem astăzi pe lîngă ele fără să ne mai întrebăm cum funcționează.

Dispozitivele optoelectronice au proprietatea de a transforma un semnal luminos într-unul electric, sau invers, emit lumină atunci cînd sînt parcurse de un curent electric.

Optoelectronica, direcție distinctă în știință și tehnică, are ca obiect de studiu fenomenele de interacție a luminii cu substanța în prezența cîmpurilor electrice (interne sau externe) și fenomenele ce conduc la emisia luminii din anumite dispozitive cînd ele sînt polarizate electric.

Drumul parcurs pînă la realizarea celulei fotoelectrice — primul dispozitiv din familie — și apoi pînă la crearea dispozitivelor optoelectronice moderne nu a fost deloc ușor. El a fost jalonat de progresele făcute în cunoașterea naturii luminii și de dezvoltarea electronicii.

În anul 1887 Heinrich Hertz evidențiază întîmplător un fenomen care va primi numele de efect fotoelectric extern. La prima vedere este ceva extrem de simplu — anumite corpuri eliberează electroni atunci cînd suprafața lor este iluminată. Explicarea și înțelegerea faptelor experimentale a fost însă mult mai dificilă decît se bănuia, pentru aceasta fiind nevoie de geniul lui Einstein și de abilitatea experimentală a lui Millikan. Recunoscînd importanța lucrărilor acestor doi fizicieni în domeniul efectului fotoelectric extern, comunitatea științifică internațională le-a acordat Premiul Nobel pentru fizică în anul 1921 și, respectiv, 1923.

Lămurirea aspectelor efectului fotoelectric extern s-a făcut în paralel cu desfășurarea disputei asupra naturii luminii, căreia i se atribuia un caracter exclusiv ondulatoriu sau exclusiv corpuscular, și a avut un rol esențial în rezolvarea ei.

Electronica modernă, bazată pe semiconductoare, a constituit un imbold important pentru studiul și crearea a noi dispozitive optoelectronice bazate pe proprietățile corpului solid.



Studiul intensiv al proprietăților materialelor semiconductoare începe în anul 1948, an în care John Bardeen și Walter Brattain anunță realizarea primului amplificator cu corp solid; era vorba de primul tranzistor cu contacte punctuale. În anul următor, William Shockley realizează tranzistorul bipolar cu joncțiuni, prezentînd în același timp și teoria funcționării acestui nou dispozitiv electronic care avea să revoluționeze tehnica. Șapte ani mai tîrziu, în 1956, acestor trei pionieri ai erei microminiaturizării avea să li se decerneze Premiul Nobel pentru fizică, primul premiu Nobel acordat pentru studii și realizări în domeniul fizicii semiconductoarelor.

Dispozitivele optoelectronice semiconductoare ocupă un loc aparte în exploziva dezvoltare tehnologică contemporană. Apărute mai recent în familia dispozitivelor electronice, gama lor se lărgește pe zi ce trece, iar fenomenele care le guvernează funcționarea sînt din ce în ce mai bine înțelese și stăpînite.

Lucrarea de față prezintă fenomenele de bază implicate în funcționarea unor dispozitive optoelectronice de largă răspîndire, insistîndu-se asupra celor semiconductoare.

Sînt înfățișate mai întîi aspecte ale interacțiunii luminii cu substanța și dispozitivele optoelectronice clasice — celula fotoelectrică și fotomultiplicatorul. Un capitol este consacrat proprietăților specifice ale semiconductoarelor și descrie principiul de funcționare a diodei și tranzistorului cu joncțiuni. Apoi se prezintă construcția, modul de funcționare și parametrii dispozitivelor optoelectronice semiconductoare — fotorezistorul, celula fotovoltaică, celula solară, fotodioda, fototranzistorul, fototiristorul, dioda electroluminescentă, dioda laser și cuplorul optic.

Ultimul capitol propune electroniștilor amatori un număr de 22 montaje, în mare parte originale, cu aplicabilitate în viața de toate zilele.

Un mic catalog rezumă principalii parametri ai dispozitivelor optoelectronice românești a căror producție a fost recent demarată.

Cartea se adresează unor categorii largi de cititori, în special elevilor de liceu în vederea aprofundării unor teme actuale ale fizicii și tehnicii, cît și în cadrul activităților practice din cercurile școlare de specialitate.

# PRIVIRE RETROSPECTIVĂ

Lumina, această permanentă necesitate a vieții și activității omului, a constituit mii de ani o mare necunoscută. Evident că toată lumea îi admitea existența, însă, deși putea fi produsă cu ușurință de oricine dispunea de o cremene și un amnar, nimeni nu știa ce este.

Mulți gînditori trebuie să-și fi pus această problemă de-a lungul timpului, însă cele mai vechi păreri pe care le cunoaștem în acest sens aparțin unor filozofi ai Greciei antice. De atunci și pînă în secolul al XVII-lea, cînd încep să se facă cercetări sistematice pentru elucidarea problemei naturii luminii, puține lucruri noi s-au petrecut în domeniul opticii. În acel moment, cînd tendința unanimă era de a fundamenta știința pe observație și pe experiment și nu pe tradiție sau metode speculative, optica dispunea doar de o noțiune clară (raza de lumină) și de două legi (pentru reflexie și refracție). Toți fizicienii secolului al XVII-lea erau de acord cu propagarea în linie dreaptă a luminii (sub formă de raze), iar legile reflexiei și refracției își găsiseră confirmarea în numeroase experimente.

De ce este însă așa și nu altfel? De ce lumina ascultă de aceste legi și nu de altele? Este evident că răspunsul trebuie să vină din altă parte și ne convingem că simpla cunoaștere a unor legități nu este întotdeauna suficientă pentru înțelegerea fenomenelor în cauză. Pentru a-l putea formula este necesar un *model teoretic*. Cum orice model reprezintă o aproximare a realității, plauzibilitatea lui este determinată de gradul de concordanță dintre deducțiile pe care le face posibile și faptele experimentale. Prin urmare, o teorie care vrea

să răspundă la întrebarea „Ce este lumina?" trebuie să poată explica, pe baza ipotezelor sale inițiale, proprietățile puse în evidență experimental. Cu cît vor fi mai puține neconcordanțele dintre previziunea teoretică și rezultatele experimentale, cu atît mai bine va reuși modelul respectiv să surprindă esența fenomenului numit lumină.

La sfîrșitul secolului al XVII-lea și începutul secolului al XVIII-lea s-au formulat două astfel de teorii.

*Teoria corpusculară* consideră lumina ca fiind alcătuită din particule (corpusculi) cărora li se atribuie două proprietăți fundamentale: viteză foarte mare de deplasare și dimensiuni extrem de mici. Cu aceste postulate se explică imediat atît traiectoria rectilinie a luminii, cît și constatarea că fasciculele de lumină nu interacționează între ele atunci cînd se întrepătrund.

Pe baza acestui model extrem de simplu înțelegem cum se formează umbra și penumbra, ne explicăm de ce iluminarea produsă de o sursă de lumină, ce emite în toate direcțiile, este invers proporțională cu pătratul distanței față de observator. Dacă celor două ipoteze le adăugăm și presupunerea că particulele care alcătuiesc lumina se comportă la ciocnire asemenea unor bile elastice, reușim să deducem calitativ și cantitativ legile reflexiei.

Mai mult, concepția corpusculară (fundamentată de Isaac Newton) ne sugerează că lumina ar trebui să exercite o anumită presiune asupra corpurilor. Pentru măsurarea acestei presiuni, extrem de mici, trebuie să dispunem de instrumente foarte sensibile. Pe vremea lui Newton ele nu existau, însă la începutul secolului nostru experimentele efectuate în acest sens de Piotr Lebedev și Nichols Hull au condus la rezultate pozitive; ei au fost primii care au reușit să măsoare presiunea luminii.

Există însă și fenomene a căror explicație nu poate fi dată în mod satisfăcător de modelul corpuscular, iar unele din consecințele aplicării lui nu sînt verificate de experiență.

Este greu de înțeles în cadrul acestei teorii de ce niște particule, chiar dacă sînt foarte mici, ocolesc obstacolele (fenomenul de difracție) în loc să fie reflectate sau absorbite de



ele și este imposibil de explicat de ce lumina albă se descompune în cele șapte culori principale ale spectrului atunci cînd traversează o prismă optică (dispersia).

În cazul refracției, teoria corpusculară poate conduce numai la o înțelegere calitativă — raza de lumină se apropie de normală atunci cînd trece dintr-un mediu transparent mai puțin dens într-altul mai dens datorită atracției pe care mediul cu densitatea mai mare o exercită asupra particulelor de lumină la suprafața de separare. Din relația matematică ce se deduce rezultă că viteza luminii ar trebui să fie mai mare în mediile transparente decît în vid. Măsurătorile efectuate în acest sens (primele aparțin lui Fizeau — 1850) au demonstrat însă contrariul.

Teoria lui Newton a avut o profundă înrîurire asupra multor fizicieni din generațiile ce i-au urmat cu toate că, după cum am văzut, o serie de fenomene optice depășesc posibilitățile de explicare ale teoriei corpusculare. Însă succesele obținute de mecanica newtoniană fuseseră prea răsunătoare și puțini erau la vremea aceea cei care puteau concepe că fondatorul acesteia ar fi putut greși în domeniul opticii.

*Teoria ondulatorie* a coexistat cu modelul corpuscular, neputîndu-și însă dovedi superioritatea decît peste aproximativ 150 de ani. Această concepție neagă reprezentarea corpusculară, ea plecînd de la constatarea că mai există și altceva ce se poate deplasa — *perturbația*. Pentru oricine observă ceea ce se întîmplă atunci cînd aruncă o piatră în apă, acest lucru este evident. În jurul locului unde piatra a atins suprafața apei se formează mici valuri care se deplasează, depărtîndu-se de locul în care a fost perturbată suprafața apei. Pare că avem de-a face cu un cerc a cărui rază crește continuu. O bucată de plută aflată pe suprafața apei, nu departe de locul unde a căzut piatra, se va mișca după un anumit timp perpendicular pe suprafața apei, revenind relativ repede la starea inițială de repaus.

Fenomenul de propagare a unei perturbații într-un mediu poartă numele de *undă*, iar totalitatea punctelor mediului atinse la un anumit moment de perturbație formează *front*ul

*de undă*. Dacă perturbarea mediului se face periodic (la intervale egale de timp, $T$) unda poate fi caracterizată prin distanța pe care se propagă perturbația în timpul unei perioade ($T$); această distanță poartă numele de *lungime de undă* ($\lambda$). Valoarea lungimii de undă se poate determina ușor dacă știm viteza ($c$) cu care se deplasează unda într-un anumit mediu și perioada perturbațiilor care o produc:

$$\lambda = cT \qquad (1)$$

Cristian Huygens, inițiatorul modelului ondulatoriu al luminii, a emis următorul principiu (care-i poartă numele): toate punctele de pe un front de undă pot fi considerate surse de producere a unor unde secundare, după un anumit timp noua poziție a frontului de undă fiind dată de suprafața care înfășoară fronturile undelor secundare.

Utilizarea construcțiilor geometrice propuse de Huygens, însoțită de raționamente simple, permite deducerea calitativă și cantitativă a legilor reflexiei și refracției, iar fenomenul de difracție apare ca o consecință firească a principiului său.

Un alt fenomen ce primește o explicație simplă în cadrul teoriei ondulatorii este dispersia. Atunci cînd traversează o prismă optică lumina albă se descompune în cele șapte culori principale ale spectrului vizibil datorită faptului că ea reprezintă o suprapunere de oscilații cu diferite lungimi de undă. Deoarece indicele de refracție depinde de lungimea de undă, diversele culori componente apar separate pe un ecran în spatele prismei. Cel care a demonstrat că nu prisma colorează lumina albă (rolul ei fiind doar acela de a o descompune în culorile componente) și a „sintetizat" pentru prima dată lumina albă din culorile spectrului — Isaac Newton — nu a reușit să facă pasul necesar spre teoria ondulatorie.

Pentru a înțelege un alt tip de succese repurtate de teoria ondulatorie este necesar să discutăm și despre o altă mărime ce caracterizează o undă — *faza*. Vom face acest lucru apelînd la ecuația undei. Să reluăm exemplul cu dopul aflat pe suprafața apei și să ne imaginăm că în vecinătatea lui există o lamelă vibratoare introdusă cu un capăt în apă



(fig. 1). Sub acțiunea valurilor produse de această lamelă dopul va avea o mișcare oscilatorie pe o direcție perpendiculară pe suprafața apei. A găsi ecuația undei înseamnă a stabili o relație pe baza căreia să putem determina, la orice

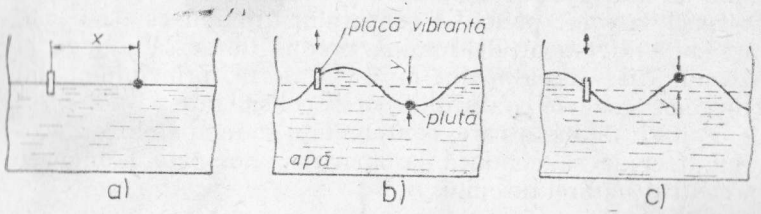



Fig. 1 — Producerea undelor superficiale în lichide: a) situația la momentul inițial; b) situația la un moment oarecare $t_1$; c) situația la momentul $t_2 > t_1$.

moment de timp, distanța $y$ ce există între dop și nivelul inițial al suprafeței libere a apei. Pentru cele mai multe procese ondulatorii, inclusiv pentru cel descris mai sus, dacă lamela este înlocuită cu o sursă punctuală de oscilații, această ecuație are forma:

$$y = a \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right] \qquad (2)$$

unde $a$ reprezintă distanța maximă la care se pot deplasa punctele mediului sub acțiunea perturbației, (față de poziția de echilibru), $T$ este perioada oscilațiilor, $\lambda$ — lungimea de undă, iar $x$ — distanța dintre sursa de oscilații și punctul considerat. În relația (2), prin intermediul unghiului $\varphi_0$ este caracterizată poziția punctului aflat la distanța $x$ la un anumit moment de timp ce urmează a fi considerat drept origine a timpului pentru procesele ulterioare. Argumentul funcției cosinus din această relație poartă numele de *fază* ($\varphi$):

$$\varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0. \qquad (3)$$

Cu toate că teoria ondulatorie reușise, după cum am văzut, să explice toate fenomenele de bază datorate luminii, la înce-

putul secolului al XIX-lea un celebru matematician francez avea să respingă teoria ondulatorie datorită concluziei la care ajungea plecînd de la premizele ei. Să-l urmăm pe Poisson în raționamentul său. Fie o sursă punctuală de lumină situată pe axa unui disc opac; deoarece distanța de la sursă la orice punct al conturului discului este aceeași, fasciculul divergent de lumină produs de sursă ajunge la extremitățile discului în fază. Conform principiului lui Huygens punctele conturului pot fi considerate ca noi surse de oscilații (lumină) care, compunîndu-se în spatele obstacolului, trebuie să conducă la apariția unei pete luminoase în centrul umbrei discului.

Trebuie să recunoaștem că este o concluzie derutantă!

Conștienți că ultimul cuvînt în fizică nu îl are raționamentul și că nu putem lua, în multe situații, decizii bazați numai pe bunul nostru simț, Arago și Fresnel au realizat experimentul imaginat de Poisson. Pentru ei, adepți ai teoriei ondulatorii, rezultatul a constituit-o surpriză plăcută — pata luminoasă prezisă apărea în centrul umbrei circulare.

Verificarea modelului ondulatoriu se poate face și prin intermediul altui fenomen — *interferența*. Teoria demonstrează că atunci cînd două unde de aceeași frecvență — a căror diferență de fază este constantă în timp — se deplasează aproximativ pe aceeași direcție, ele se pot compune în așa fel încît energia undei rezultate să prezinte maxime și minime. În cazul luminii, ca urmare a interferenței, ar trebui să se obțină pe un ecran zone luminoase separate între ele prin zone mai întunecate. Ansamblul acestor zone poartă numele de franje de interferență. Încercările de evidențiere experimentală a acestui fenomen au dat greș pînă în anul 1801, deoarece experimentatorii nu reușeau să realizeze două surse coerente de lumină, adică două surse care să emită cu diferență de fază constantă. O astfel de problemă depășea cu mult nivelul tehnologic al acelor timpuri, însă o idee „salvatoare" a permis punerea în evidență a interferenței fără a realiza *efectiv* cele două surse. Această idee i-a aparținut lui Thomas Young. Dispozitivul folosit de el pentru



obținerea interferenței undelor luminoase este foarte simplu (fig. 2).

În experimentul realizat de Young, lumina (solară) pătrundea într-o cameră întunecată printr-un orificiu foarte mic $O$. Datorită fenomenului de difracție, unda luminoasă ajunge la orificiile $O_1$ și $O_2$ (la fel de mici ca $O$) care devin astfel surse coerente. Lumina ce pleacă de la noile surse ($O_1$, $O_2$) interferă pe ecranul din dreapta (fig. 2) unde se pot observa franjele.

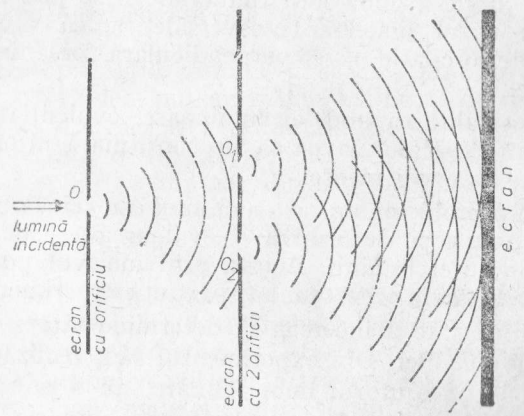



Fig. 2 — Dispozitivul lui *Young* pentru producerea interferenței undelor luminoase.

Rezultatul obținut de Young nu numai că a constituit o verificare necesară a afirmațiilor teoretice, ci a permis ca prin măsurători asupra franjelor de interferență să se poată deduce pentru prima oară lungimea de undă a luminii. Calculele au condus la valoarea 500 nm.

Fenomenul de *polarizare* a luminii, evidențiat de Étienne-Louis Malus, în 1809, avea să aducă precizări în privința tipului oscilațiilor ce produc undele luminoase. Malus a constatat că intensitatea razelor reflectate depinde

de orientarea planului de incidență a luminii. Dacă lumina se reflectă succesiv pe două oglinzi se observă că, la o anumită valoare a unghiului de incidență, reflexia pe a doua oglindă nu se mai produce atunci cînd planele de incidență ale oglinzilor sînt perpendiculare între ele. Prima oglindă, pe care se reflectă lumina provenită direct de la sursă, poartă numele de polarizor, lumina ce pleacă de pe această oglindă fiind lumină polarizată.

Fenomenul evidențiat în acest tip de experimente nu ar putea avea loc dacă am considera lumina, așa cum proceda Huygens, drept o undă longitudinală. El se poate produce numai în cazul undelor transversale, adică atunci cînd direcția de oscilație este perpendiculară pe direcția de propagare.

Transversalitatea undelor luminoase, evidențiată pentru prima oară de Malus, avea să fie confirmată ulterior și de alte tipuri de experimente.

Există o problemă pe care nici unul din cele două modele prezentate nu o poate rezolva — evaluarea pe cale teoretică a valorii vitezei luminii. Acesta este motivul pentru care primele precizări în acest sens au aparținut experimentatorilor.

Cel dintîi care a încercat să determine viteza luminii a fost Galileo Galilei. Din experimentul său, realizat în jurul anului 1600 cu ajutorul unor felinare, nu a putut concluziona decît că „dacă nu este instantanee, lumina este oricum foarte rapidă".

Prima valoare a vitezei luminii a fost obținută de un astronom — Olaus Roemer. El a sesizat o neperiodicitate în producerea eclipselor sateliților lui Jupiter și a avut ideea să pună acest decalaj temporal pe seama timpului diferit necesar luminii pentru a ajunge la Pămînt, poziția Pămîntului în spațiu schimbîndu-se datorită rotației în jurul Soarelui. Calculele sale au estimat viteza luminii la aproximativ 321 000 km/s.

Măsurătorile de acest tip sînt foarte dificil de făcut și adversarii lor aveau la îndemînă un bogat arsenal de argu-



mente. În același timp valoarea „enormă" a vitezei luminii atrage atenția asupra dificultății găsirii unei metode terestre de investigare. Și într-adevăr metoda roții dințate (Fizeau) și a oglinzii rotitoare (Foucault) au putut fi puse în aplicare abia la mijlocul secolului al XIX-lea. Viteza luminii determinată pe baza lor s-a dovedit a avea aproximativ aceeași valoare cu cea găsită de Roemer — 300 000 km/s.

De atunci s-au efectuat numeroase experimente pentru determinarea valorii vitezei luminii prin diferite alte metode și aranjamente experimentale. Erorile s-au micșorat treptat însă ordinul de mărime a rămas același. Cea mai bună valoare experimentală considerată acum este 299 792,4562 $\pm$ 0,000011 km/s.

Cu toate că proprietățile luminii, cunoscute pînă la mijlocul secolului al XIX-lea, puteau fi bine explicate de teoria ondulatorie, nu se știa încă ce este lumina. Se putea afirma doar că ea reprezintă o vibrație (undă) transversală, însă nimeni nu putea spune *ce* anume vibrează. Răspunsul nu a putut fi dat de optică, ci de un domeniu care părea să nu aibă nici o tangență cu ea — electricitatea, mai precis electromagnetismul.

Primul care a pus în evidență existența unei legături între magnetism și lumină a fost Michael Faraday. Experimentele sale evidențiază, în anul 1845, un fenomen nou: dacă un fascicul de lumină polarizată traversează o regiune în care există un cîmp magnetic, direcția lui de propagare fiind paralelă cu direcția cîmpului, planul de polarizare se rotește. Această descoperire, în loc să clarifice situația, a ridicat noi probleme.

Într-unul din puținele articole scrise de el, intitulat „Reflecții despre vibrațiile razelor", apărut în 1846, Faraday se întreba dacă nu cumva liniile de forță ce leagă corpurile încărcate electric ar putea transmite unde, așa cum o fac corzile întinse.

Răspunsul a fost dat de James Clerk Maxwell. Cele patru ecuații ale sale nu numai că sintetizau tot ce se cunoștea despre electricitate și magnetism, dar prevedeau existența unor unde transversale (undele electromagnetice), care își

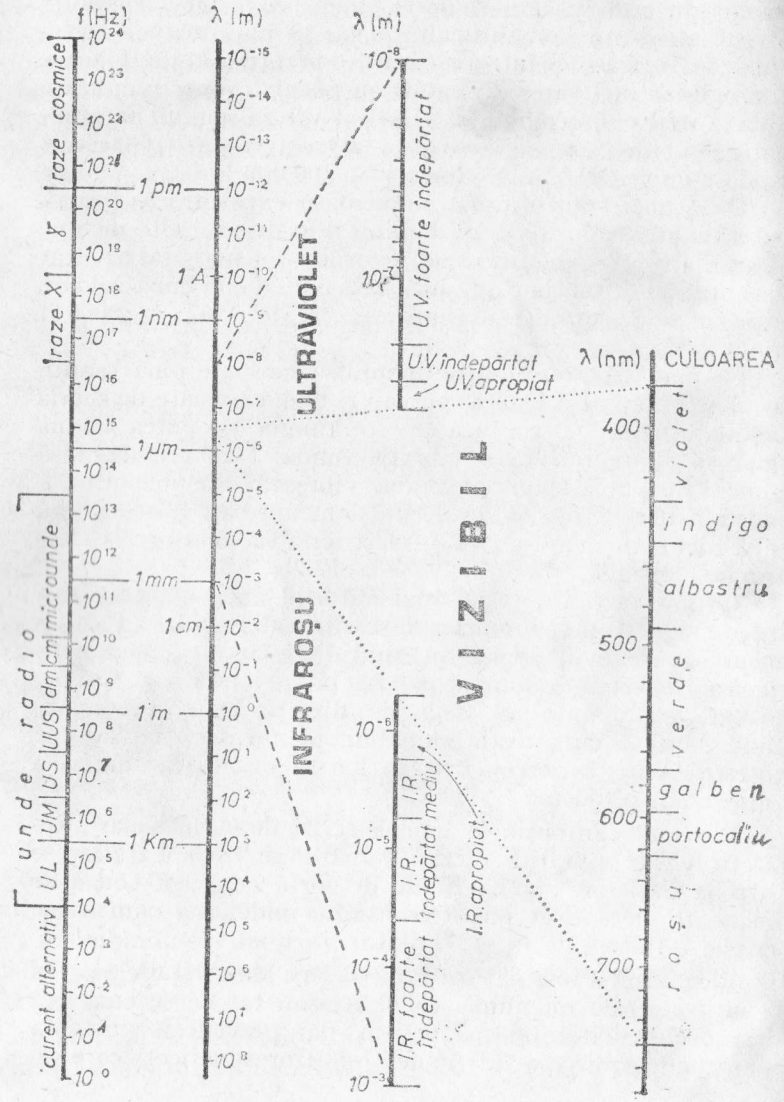



Fig. 3 — Spectrul undelor electromagnetice.

au originea în mișcarea accelerată a sarcinilor electrice. Aceste unde ar trebui să se propage în vid cu viteza de 300 000 km/s și, datorită faptului că transportă impuls, trebuie să exercite o anumită presiune asupra corpurilor.

Avînd încredere în rezultatele teoretice ale lui Maxwell, Heinrich Hertz începe o serie de experimente al căror rezultat nu l-a făcut public decît în 1888. Articolul său din acel an aducea la cunoștința lumii științifice modul în care a reușit să producă unde electromagnetice și o serie de proprietăți ale acestora evidențiate experimental: propagare rectilinie, transversalitate, reflexie, refracție și polarizare.

Observînd că undele electromagnetice posedă toate proprietățile cunoscute ale luminii, concluzia se impune de la sine — lumina este o undă electromagnetică, ea reprezentînd doar o mică parte din spectrul undelor electromagnetice (fig. 3).

# EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN

Argumentele experimentale aduse de Hertz în favoarea teoriei lui Maxwell au fost hotărîtoare. După ce el și-a expus rezultatele, alegerea părea definitiv făcută în favoarea teoriei ondulatorii. Cu toate că era vorba de cu totul altfel de unde decît cele luate în considerare cu două sute de ani în urmă, se dovedise că acestea posedă toate proprietățile luminii. Nimeni nu mai punea la îndoială originea electromagnetică a luminii și faptul că unda asociată ei este o undă electromagnetică.

În această perioadă de sfîrșit al secolului al XIX-lea fizicienii experimentatori evidențiaseră însă existența unui fenomen nou și nimeni nu putea bănui întorsătura pe care o vor lua lucrurile atunci cînd legile acestui fenomen vor fi cunoscute.

Este vorba de *efectul fotoelectric extern*, care constă în emisia electronilor din metale, atunci cînd suprafața lor este iluminată.

După cum deja am menționat, prima referire la acest efect o face Hertz. În timpul experimentărilor pentru producerea undelor electromagnetice, el a constatat că descărcarea electrică indusă între două bile de zinc se produce mai ușor dacă între ele și eclatorul emițător nu există obiecte opace. Deoarece această constatare era ceva neobișnuit el își concentrează pentru un timp atenția asupra ei și stabilește drept cauză a fenomenului lumina ultravioletă emisă de scînteia eclatorului.

Un an mai tîrziu, în 1888, Wilhelm Hallwachs observă că lumina ultravioletă produce descărcarea unei sfere metalice încărcată negativ, nu însă și a uneia încărcată pozitiv.



Seria observațiilor calitative este încheiată în 1889 de Thomson și Lenard; ei au demonstrat că lumina ultravioletă smulge electroni din metalele pe suprafața cărora cade.

Studierea calitativă a efectului fotoelectric extern se poate face cu aranjamentul experimental prezentat în figura 4. Doi electrozi metalici (catodul $K$ și anodul $A$) sînt plasați într-un tub de cuarț vidat, singura sursă de lumină din locul

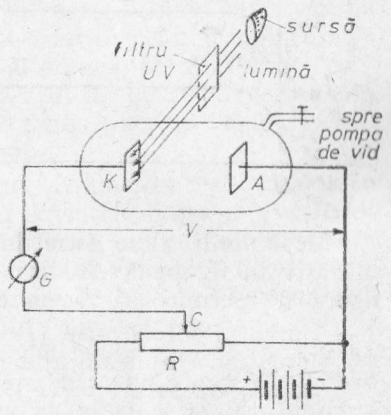



Fig. 4 — Dispozitiv pentru studiul experimental al efectului fotoelectric extern.

unde se fac măsurătorile fiind cea cu care se iluminează catodul. Pentru realizarea tubului se alege cuarțul deoarece prezintă o transparență foarte ridicată din ultraviolet pînă în infraroșu. Legarea în circuit a electrozilor se face în așa fel încît diferența de potențial ($V$) dintre ei să poată fi variată prin mișcarea cursorului $C$ pe rezistorul $R$. Curenții ce apar în circuit, datorită deplasării electronilor prin tub între catod și anod, sînt indicați de galvanometrul $G$. Experimentele se fac în lumină monocromatică, în acest scop putîndu-se utiliza fie un monocromator, fie filtre optice cu banda de trecere îngustă.

Cele două tipuri de experimente pe care le vom descrie se pot realiza cu această instalație și permit evidențierea principalelor caracteristici ale efectului fotoelectric extern.

Primul experiment își propune să stabilească dependența fotocurentului de tensiunea electrică aplicată între electrozi atunci cînd spre catod este trimis un fascicul de lumină ultravioletă. Rezultatele obținute pentru două intensități

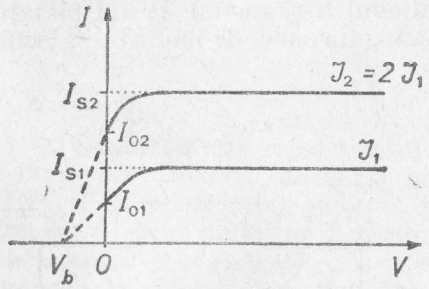



Fig. 5 — Dependența curentului fotoelectric $i$ de tensiunea aplicată electrozilor.

($\mathcal{J}$) ale luminii, alese astfel încît $\mathcal{J}_2 = 2\mathcal{J}_1$, sînt prezentate calitativ în figura 5. Analiza celor două curbe din această figură ne permite să facem cîteva observații importante:

1 — Curentul fotoelectric ($I$) crește odată cu diferența de potențial $V$ aplicată ajungînd la o valoare maximă constantă, de saturație ($I_s$), pentru tensiuni relativ mici (de ordinul volților). Această alură a curbei este ușor de explicat: pe măsură ce tensiunea dintre electrozi crește, cîmpul electric între ei devine mai intens ceea ce face ca un număr mai mare din fotoelectronii emiși de catod să fie orientați spre anod. Cînd toți fotoelectronii sînt orientați de cîmpul electric dintre anod și catod, curentul din circuit atinge valoarea maximă (de saturație).

2 — Valoarea curentului de saturație se dublează ($I_{s_2} = 2I_{s_1}$) dacă se dublează intensitatea luminii; numărul fotoelectronilor emiși de catod este prin urmare proporțional cu intensitatea luminii.

3 — Chiar dacă între electrozi nu se aplică tensiune ($V = 0$) în circuit apare un curent electric ($I_0$). Pentru a înțelege acest fenomen să examinăm mai atent ce se întîmplă în vecinătatea electrodului iluminat. Extragerea unor



electroni echivalează cu o încărcare pozitivă a electrodului, cîmpul electric apărut în acest fel atrăgînd înapoi spre placă electronii emiși. Cum placa metalică este iluminată continuu, după un anumit timp se va ajunge la un echilibru dinamic între electronii ce ies și cei ce intră prin suprafața metalului. În apropierea plăcii iluminate se formează în acest fel un nor electronic, între nor și placă existînd o diferență de potențial electric (numită și barieră de potențial). Deoarece însă fotoelectronii sînt emiși cu energii cinetice diferite, cei mai rapizi dintre ei vor putea „străpunge" bariera de potențial creată continuîndu-și mișcarea. Curentul $I_0$ se datorează unora dintre acești electroni, și anume acelora care reușesc să ajungă la electrodul opus.

4 — Curentul fotoelectric poate fi micșorat sub valoarea $I_0$ prin inversarea sensului tensiunii aplicate (electrodul iluminat legat la borna pozitivă iar celălalt la borna negativă a sursei). La o anumită valoare a acestei tensiuni inverse, numită tensiune de blocare ($V_b$) curentul devine zero; cu alte cuvinte nici electronii cu energia cinetică cea mai mare nu pot atinge în aceste condiții electrodul neiluminat. Prin urmare $V_b$ reprezintă o măsură a energiei cinetice maxime ($E_{c\,max}$) a fotoelectronilor, $E_{c\,max} = qV_b$, unde $q$ reprezintă valoarea sarcinii electronului.

5 — Valoarea tensiunii de blocare nu depinde de intensitatea luminii.

Prin urmare, oricît de intensă ar fi lumina, energia cinetică maximă a electronilor extrași din metal este aceeași.

Această ultimă constatare nu-și poate găsi explicația în cadrul teoriei ondulatorii. Conform acestei teorii, pe măsură ce crește intensitatea luminii trebuie să se mărească energia cinetică a fotoelectronilor, această concluzie fiind, după cum se vede, în dezacord evident cu constatările experimentale. Este *primul* aspect al efectului fotoelectric extern ce pune în impas concepția ondulatorie asupra luminii.

Al doilea tip de experimente ce se pot realiza cu instalația prezentată în figura 4 constă în determinarea energiei cine-

tice maxime a fotoelectronilor în funcție de frecvența (culoarea) luminii incidente. În acest scop, filtrul pentru ultraviolet (UV) trebuie înlocuit, pe rînd, cu filtre corespunzătoare.

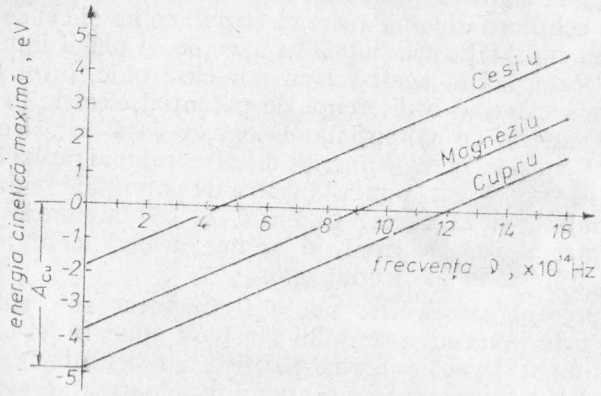



Fig. 6 — Dependența energiei cinetice maxime a fotoelectronilor de frecvența luminii incidente.

Rezultatele unor astfel de determinări pentru trei catozi confecționați din metale diferite sînt prezentate în figura 6, figură ce evidențiază următoarele:

a) Energia cinetică maximă a fotoelectronilor crește pe măsură ce se mărește frecvența luminii.

b) În cazul tuturor metalelor, dependența este liniară, dreptele corespunzătoare fiind paralele între ele. Ecuația unei asemenea drepte poate fi scrisă sub forma:

$$E_{c\,max} = A + b\nu, \qquad (4)$$

unde $A$ reprezintă ordonata la origine, iar $b$ — coeficientul unghiular (panta). În timp ce panta tuturor dreptelor este aceeași (experimentele conduc la valoarea $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J · s), ordonata la origine este diferită, fiecărui metal fiindu-i propriu o anumită valoare a lui $A$.

c) Pentru fiecare metal există o anumită frecvență minimă ($\nu_0$) a luminii, numită frecvență de prag, începînd de



la care apar electroni în exterior. Dacă frecvența luminii este mai mică decît frecvența de prag, efectul fotoelectric extern nu se mai produce, oricît de intensă ar fi lumina.

Existența frecvenței de prag este *a doua* caracteristică a efectului fotoelectric extern ce nu poate fi explicată pe baza teoriei ondulatorii, conform căreia efectul ar trebui să se producă pentru orice frecvență a luminii, cu condiția ca intensitatea ei să fie suficient de mare.

Mai există un aspect *(al treilea)* pe care teoria ondulatorie nu-l poate explica. Este vorba de decalajul temporal între momentul iluminării suprafeței metalului și momentul emisiei fotoelectronilor.

Calculele bazate pe teoria ondulatorie conduc la concluzia că acest decalaj trebuie să fie cu atît mai mare cu cît puterea radiantă a sursei de lumină este mai mică. De exemplu, în cazul unei surse monocromatice cu puterea de 0,001 W plasată la 20 cm de o placă metalică a cărei constantă $A$ are valoarea 5 eV, ar trebui să treacă aproximativ 13 minute din momentul iluminării metalului pînă la apariția curentului fotoelectric.

Experimentele făcute în scopul măsurării acestui decalaj temporal au condus însă la rezultate negative — ele nu au putut evidenția nici o întîrziere în apariția efectului fotoelectric extern.

Impasul teoriei ondulatorii în explicarea efectului fotoelectric extern este evident — conceptele și ideile vechi nu mai erau suficiente.

În anul 1905 Einstein reușește să clarifice lucrurile pe baza unei ipoteze pe care Millikan o califica drept „îndrăzneață ca să nu spun nesăbuită".

Cu cinci ani mai înainte, Max Planck reușise să explice dependența distribuției spectrale a radiației emise de corpurile încălzite, presupunînd că lumina nu este emisă continuu, ci în cantități bine determinate (cuante), energia unei cuante ($E$) fiind proporțională cu frecvența: $E = h\nu$. Constanta de proporționalitate $h$ a primit numele de constanta lui Planck,

valoarea ei fiind $6{,}625 \cdot 10^{-34}$ J · s. Se născuse astfel, în 1900, fizica cuantică.

Deși formulase ipoteza emisiei discontinue a luminii, Planck considera că propagarea ei prin spațiu se face sub formă de unde electromagnetice.

Spre deosebire de el, Einstein a considerat că lumina se propagă prin spațiu mai degrabă ca o particulă decît ca o undă, ea neputînd fi absorbită decît tot în cantități discrete, așa cum fusese emisă. Energia maximă pe care o poate transfera cuanta de lumină (fotonul) unui electron va fi prin urmare egală cu $h\nu$, iar ecuația pe care Einstein o propune pentru explicarea efectului fotoelectric extern este:

$$h\nu = E_0 + E_{c\,max}. \qquad (5)$$

Mărimea $E_0$ din această ecuație reprezintă energia ce trebuie dată unui electron pentru ca acesta să poată traversa suprafața metalului. Ea a primit numele de *energie de extracție*.

Ecuația (5) rezolvă toate problemele în fața cărora teoria ondulatorie rămînea fără argumente:

A — Creșterea intensității luminii înseamnă mărirea numărului de fotoni (deci al actelor elementare de absorbție), ceea ce are ca urmare emiterea unui număr sporit de electroni, obținîndu-se prin urmare o valoare mai mare a curentului fotoelectric. Nu poate fi vorba de vreo modificare a energiei cinetice maxime a electronilor, deoarece în lumină monocromatică energia tuturor cuantelor este aceeași, iar un foton nu transferă energie decît unui singur electron.

B — Existența frecvenței de prag ($\nu_0$) se deduce imediat, ea reprezentînd frecvența la care electronul extras din metal nu are energie cinetică ($h\nu_0 = E_0$). Prin urmare efectul fotoelectric extern nu se poate produce decît dacă fotonii au cel puțin energia $h\nu_0$. Frecvenței minime $\nu_0$ îi va corespunde o lungime de undă maximă ($\lambda_{max}$) care, datorită situării spre zona roșie a spectrului, a primit numele de *prag roșu fotoelectric*.

C — Deoarece transferul de energie de la foton la electron se face în mod direct, energia cuantei nefiind distribuită în spațiu, emisia fotoelectronilor trebuie să fie instantanee.



Asemănarea dintre ecuațiile (5) și (4) este izbitoare și probabil că cititorul s-a întrebat de ce mai era nevoie de vreo ipoteză dacă ecuația fusese deja găsită din măsurători experimentale, iar în legătură cu constanta $b$ din ecuația (4) se putea trage concluzia, pe baza valorii ei numerice, că reprezintă tocmai constanta lui Planck.

Este momentul să spunem că atunci cînd și-a formulat teoria, Einstein nu a cunoscut rezultatele prezentate în figura 6, dovezile experimentale pe care el s-a bazat fiind mult mai restrînse. Aceste rezultate, și odată cu ele ecuația (4), au fost obținute după aceea prin experimentările minuțioase efectuate de Millikan în 1916.

Succesul repurtat de concepția fotonică în explicarea efectului fotoelectric extern înseamnă oare o repunere în drepturi a modelului corpuscular? Categoric nu. El ne atrage însă atenția că lumina nu poate fi considerată *numai* o undă electromagnetică.

După cum se obișnuiește să se spună astăzi, lumina are un *caracter dual*, ea putînd fi descrisă atît în termeni ondulatorii, cît și corpusculari.

O altă implicație a descoperirii și înțelegerii efectului fotoelectric extern este deschiderea unui nou drum în tehnică. Este vorba de realizarea primelor dispozitive optoelectronice, dispozitive a căror funcționare este nemijlocit legată de prezența luminii.

## CELULA FOTOELECTRICĂ

Celula fotoelectrică este primul dispozitiv optoelectronic realizat de om. Construcția tipică pentru o asemenea celulă este prezentată în figura 7. Pe o porțiune a unui tub de sticlă (sau cuarț, dacă se preconizează utilizarea în domeniul ultraviolet) este depus un strat de metal alcalin (Cs, Rb, K) care constituie fotocatodul. Anodul, plasat în fața fotocatodului, poate fi format dintr-un fir, un inel sau o plasă metalică.

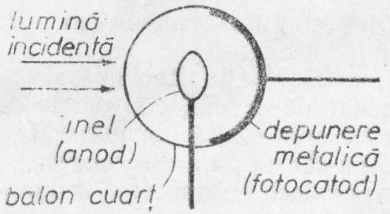



Fig. 7 — Construcție tipică a unei celule fotoelectrice.

Interiorul tubului poate fi vidat sau umplut cu gaz, această deosebire constructivă influențînd, după cum vom vedea, atît funcționarea, cît și sensibilitatea la lumină a celulei fotoelectrice.

*Celulele fotoelectrice cu vid* se utilizează în regim polarizat, aplicînd la bornele lor o tensiune electrică continuă de la o sursă exterioară (fig. 8). Cîmpul electric ce ia naștere în

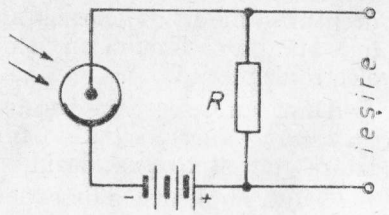



Fig. 8 — Conectarea în circuitul electric a celulei fotoelectrice.

celulă între anod și catod orientează mișcarea fotoelectronilor (de la catod la anod), ceea ce conduce la apariția unui curent electric în circuitul exterior. În figura 9 este reprezentată o familie de caracteristici curent-tensiune pentru o celulă fotoelectrică cu vid la fluxuri luminoase diferite. Aceste caracteristici au aceeași alură cu cele din figura 5 ce au fost obținute cînd studiam din punct de vedere cantitativ efectul fotoelectric extern. Bineînțeles că și informațiile pe care ni le dau sînt aceleași.

Pentru a utiliza eficient o celulă fotoelectrică trebuie să-i cunoaștem răspunsul la diverse lungimi de undă (caracteristica spectrală). Obținerea unei asemenea caracteristici se face prin măsurarea curentului de saturație al celulei la diverse lungimi de undă, în condițiile menținerii unei valori constante



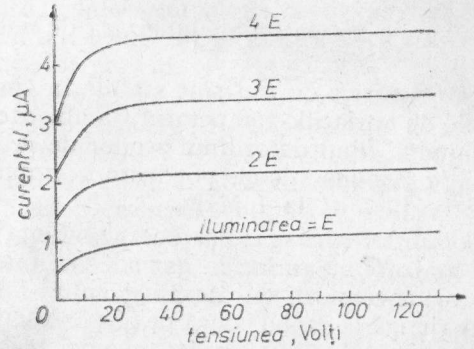



Fig. 9 — Familie de caracteristici curent-tensiune pentru o celulă fotoelectrică cu vid.

a fluxului luminos incident. Două asemenea caracteristici, pentru doi fotocatozi diferiți (Cs și Sb+Cs), sînt prezentate în figura 10; în fiecare caz curenții au fost normați la valorile lor maxime pentru a permite o comparație mai ușoară. Dependența răspunsului maxim al celulelor fotoelectrice de lungimea de undă a luminii se datorează materialului din care este realizat fotocatodul, natura acestui material deter-

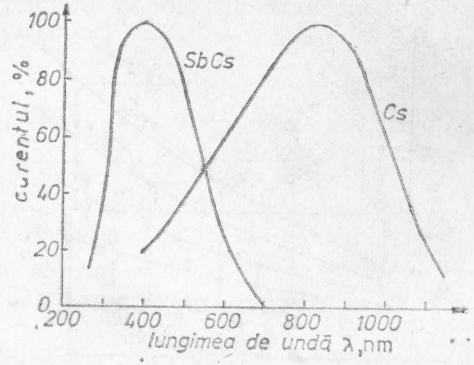



Fig. 10 — Caracteristici spectrale pentru celule fotoelectrice cu catozi de Cs și SbCs.

minînd, după cum s-a menționat, lungimea de undă de prag ($\lambda_{max}$).

Celulele fotoelectrice cu vid sînt stabile în timp, practic neinfluențabile de variațiile temperaturii ambiante, sensibilitatea lor la lumină fiind de ordinul zecilor de μA/lm. Datorită timpului de răspuns mic ele pot lucra în impulsuri luminoase cu frecvența pînă la 1 MHz.

*Celulele fotoelectrice cu gaz* își bazează funcționarea pe procesele de ionizare ce au loc în gaz sub acțiunea fotoelectronilor. Datorită ciocnirii cu atomii gazului, fotoelectronii nu reușesc să ajungă la „anod" dacă pe dispozitiv nu se aplică o tensiune electrică ($I_0 = 0$). Aplicarea unei tensiuni continue duce la apariția unui cîmp electric (în interiorul celulei) care accelerează fotoelectronii spre anod. Acești fotoelectroni ionizează atomii gazului, ionii pozitivi și electronii rezultați sînt accelerați de cîmpul electric spre electrozi, putînd produce la rîndul lor ionizări secundare dacă dispun de suficientă energie cinetică. Ca urmare a acestor fenomene curentul electric ce se obține la un flux luminos constant este puternic dependent de tensiunea aplicată (fig. 11). Fenomenul de saturare a curentului nu mai apare, limitarea acestuia fiind determinată de tensiunea aplicată celulei. Din

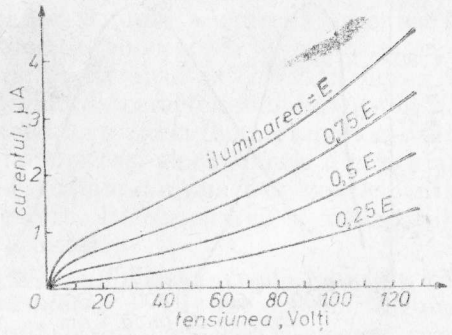



Fig. 11 — Familie de caracteristici curent-tensiune pentru o celulă fotoelectrică cu gaz.



această cauză celulele fotoelectrice cu gaz au, la tensiuni mari, sensibilitatea mai ridicată (de cîteva ori) decît a celulelor fotoelectrice cu vid.

La ambele tipuri de celule suprafața fotocatodului este de ordinul centimetrilor pătrați, iar tensiunile de alimentare sînt cuprinse între 100 V și 200 V. Pentru a proteja fotocatodul este necesar ca în timpul funcționării curentul să nu depășească 5 μA pe centimetrul pătrat de arie fotosensibilă.

Celulele fotoelectrice au aplicații în fotometrie (măsurarea fluxurilor luminoase), cinematografie („citirea" pistei sonore a filmelor) și automatizări (supraveghetoare de flacără, avertizoare etc.).

## FOTOMULTIPLICATORUL

Acest dispozitiv, prezentat schematic în figura 12, este alcătuit dintr-un tub de sticlă vidat în interiorul căruia se află fotocatodul, mai mulți electrozi (dinode, *D*) ce alcătuiesc sistemul de multiplicare și anodul. Fotocatodul efectuează conversia fotoni-electroni. El este format dintr-un strat emisiv depus pe un suport opac sau semitransparent. Dacă suportul este opac fotoelectronii sînt emiși înspre partea de unde vine lumina. Suporturile transparente sînt cele mai

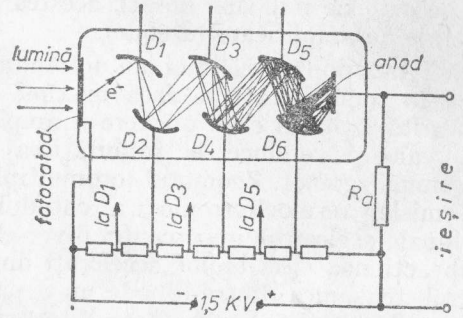



Fig. 12 — Alcătuire schematică a unui fotomultiplicator.

utilizate deoarece ele constituie și fereastra de intrare a luminii în fotomultiplicator; în acest caz catodul este plasat la un capăt al tubului (fig. 12), iar fotoelectronii sînt emiși în sensul de propagare al luminii.

Compoziția principalelor tipuri de fotocatod este dată de formulele Sb-Cs, Na-K-Sb-Cs, Cs-Te, Bi-Ag-O-Cs, Sb-Cs-O, răspunsul lor spectral acoperind domeniul 0,2—1,1 μm. Între fotocatod și prima dinodă există un sistem electrono-optic care are rolul de a focaliza electronii proveniți de la fotocatod.

Dinodele au pe suprafața lor un strat de SbCs sau sînt confecționate din Ag-Mg și activate prin expunere la vapori de cesiu. În timpul funcționării ele se află la potențiale din ce în ce mai pozitive față de catod, diferențele de potențial dintre ele accelerînd electronii. Sub acțiunea electronilor accelerați dinodele emit un număr mare de electroni (emisie secundară), numărul de fotoelectroni inițiali fiind astfel mărit de sute de mii de ori.

Electronii colectați de anod constituie curentul electric care străbate rezistorul $R_a$ conectat în circuitul anodic, căderea de tensiune pe acest rezistor reprezentînd semnalul electric ce se utilizează.

Există două categorii de fotomultiplicatoare. Cele denumite *comerciale* sînt utilizate în spectrometrie și au amplificări de ordinul zecilor de milioane de ori. Fotomultiplicatoarele *rapide* sînt destinate utilizării în fizica nucleară și au amplificări de sute de milioane de ori, acestea realizîndu-se cu 12—14 etaje de amplificare (dinode).

Trebuie să menționăm că nici un fotomultiplicator nu funcționează în condiții care să facă maximă amplificarea pe etaj, datorită faptului că o creștere a amplificării peste o anumită valoare conduce la înrăutățirea (micșorarea) raportului semnal/zgomot. Zgomotul fotomultiplicatorului se datorează emisiei termoelectronice a catodului, ionizării gazelor reziduale și electroluminescenței diverselor substanțe din tub sub acțiunea electronilor accelerați din fluxul util.

În general, tensiunea dintre dinode nu depășește 150 V, ceea ce corespunde unei valori de 3 sau 4 a coeficientului de emisie secundară, acest coeficient reprezentînd raportul dintre numărul de electroni emiși de o dinodă și numărul de electroni incidenți pe ea. Sensibilitatea la lumină a fotomultiplicatoarelor poate depăși 1000 A/lm, iar timpul de răspuns mic (de ordinul nanosecundelor) nu pune probleme deosebite la lucrul în impulsuri luminoase.



Amplificarea lor deosebit de mare face ca fotomultiplicatoarele să fie foarte utile cînd fluxurile luminoase ce trebuie măsurate sînt extrem de mici. După cum s-a mai menționat, un astfel de domeniu este spectrometria. În celălalt domeniu, fizica nucleară, fotomultiplicatoarele sînt utilizate la realizarea contorilor de particule cu scintilație. Pentru realizarea unui asemenea contor, în fața fotocatodului este plasat un material scintilator, iar semnalul furnizat este amplificat și analizat cu ajutorul unui sistem electronic

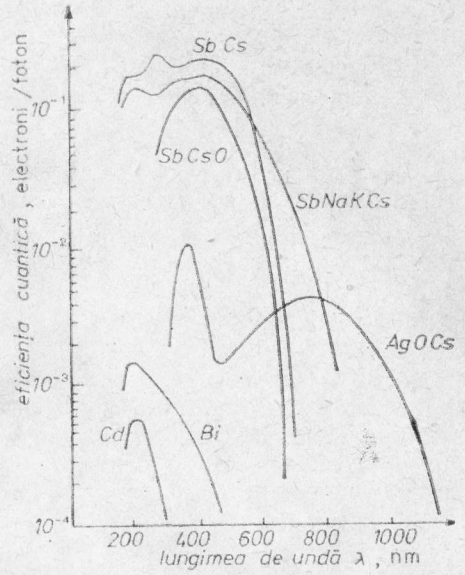



Fig. 13 — Dependența eficienței cuantice a diverselor tipuri de fotocatozi de lungimea de undă a luminii incidente.

adecvat. Materialele scintilatoare produc scînteieri luminoase (atunci cînd sînt străbătute de radiațiile nucleare) care ajung la fotocatod. În funcție de compoziția scintilatorului, un contor poate număra particule alfa, beta sau radiații gamma. Răspunsul fotocatodului trebuie să fie adecvat lungimii de undă a luminii emise de scintilator. Pentru o utilizare eficientă a fotomultiplicatoarelor la realizarea contorilor, este necesară cunoașterea dependenței eficienței cuantice (număr de electroni emiși/număr de fotoni incidenți) a fotocatodului în funcție de lungimea de undă a luminii incidente. O astfel de dependență este prezentată în figura 13 pentru cîteva tipuri de fotocatozi; în toate cazurile fereastra de intrare este din cuarț.

## EFECTUL FOTOELECTRIC INTERN — SEMICONDUCTOARE

Atunci cînd anumite substanțe sînt iluminate se observă și un alt fenomen — scăderea rezistenței electrice. Dacă fasciculul de lumină este întrerupt, ea revine după un anumit timp la valoarea inițială. Deoarece rezistența electrică este cu atît mai mică cu cît numărul purtătorilor liberi de sarcină electrică este mai mare, înseamnă că sub acțiunea luminii are loc o creștere a numărului acestor purtători.

Fenomenul de variație a rezistenței electrice sub acțiunea luminii a primit numele de *efect fotoelectric intern*. El se manifestă foarte pronunțat în cazul semiconductoarelor. Înțelegerea efectului necesită pe de o parte cîteva detalii legate de conducția curentului electric, iar pe de altă parte înțelegerea specificului substanțelor semiconductoare.

### CONDUCTIBILITATEA METALELOR

Conductibilitatea electrică a metalelor se datorează mișcării ordonate a electronilor liberi supuși acțiunii unui cîmp electric. În teoria electronică clasică a conductibilității metalelor (Drude — Lorentz) se fac de la început două ipoteze simplificatoare:

— electronul nu are volum propriu;

— electronii nu interacționează între ei.

Aceste ipoteze, preluate de la teoria cinetică a gazelor, ne permit să considerăm că ansamblul electronilor liberi dintr-un metal formează un „gaz" (gazul electronic) aflat în echilibru termic cu ionii rețelei cristaline. Teoria gazului electronic

a condus la rezultate bune, cu toate că atunci cînd a fost elaborată (secolul al XIX-lea) ipoteza a doua era insuficient justificată. Să analizăm puțin aceste ipoteze.

Electrodinamica clasică, considerînd că masa electronului este de natură electromagnetică, ajunge la concluzia că raza electronului este de ordinul $10^{-13}$ cm, ceea ce înseamnă un volum propriu de aproximativ $10^{-39}$ cm$^3$. Cum în metale numărul de electroni liberi dintr-un centimetru cub este de ordinul $10^{22}$, rezultă că volumul ocupat de aceștia reprezintă:

$$10^{-39}\text{cm}^3 \times 10^{22}\text{cm}^{-3} = 10^{-17}$$

din volumul total al corpului considerat. Prin urmare, volumul propriu al electronilor ce formează gazul electronic fiind foarte mic, prima ipoteză este justificată.

Spre deosebire de moleculele unui gaz, electronii sînt particule încărcate electric și, conform legii lui Coulomb, ei se vor respinge reciproc. Pe de altă parte, nucleele încărcate pozitiv exercită asupra ansamblului electronilor forțe de atracție. În principiu este posibil ca aceste două tipuri de interacțiuni opuse să conducă la o rezultantă nulă și atunci ar fi justificată și ipoteza a doua. Certitudinea în acest sens ne-o oferă mecanica cuantică. Cadrul ei matematic permite o demonstrare riguroasă a faptului că electronii de conducție din interiorul unui metal sînt într-adevăr liberi, metalul fiind prin urmare un mediu echipotențial.

În mișcarea lor prin metal electronii liberi se ciocnesc de ionii rețelei cristaline. Fiecare ciocnire, presupusă elastică, are ca efect modificarea direcției de mișcare a electronilor. Caracterul aleatoriu al acestor ciocniri face ca media vectorului viteză a *oricărui* electron, calculată pe un interval de timp suficient de mare, să fie egală cu zero. Dacă viteza medie este nulă, rezultă că în medie electronii nu se deplasează și prin urmare datorită agitației termice nu poate apare o mișcare ordonată a lor pe o anumită direcție. Agitația termică nu poate deci conduce la apariția unui curent electric.

Atunci cînd între două puncte ale unui metal se stabilește o diferență de potențial, în interiorul lui se creează un



cîmp electric $\vec{\xi}$. Sub acțiunea acestui cîmp asupra fiecărui electron liber se va exercita o forță $\vec{F}$:

$$\vec{F} = q\vec{\xi}, \tag{6}$$

$q$ fiind sarcina electronului.

Din legea a doua a dinamicii ($\vec{F} = m\vec{a}$) și din relația (6) deducem că accelerația imprimată de cîmpul electric unui electron liber de masă $m$ este:

$$\vec{a} = \frac{q}{m}\vec{\xi} \tag{7}$$

După un timp $t$ viteza unui electron ce se mișcă cu accelerația $\vec{a}$ va fi:

$$\vec{v} = \vec{a}\,t = \frac{q}{m}\vec{\xi}t, \tag{8}$$

fiind orientată în sens invers cîmpului electric ($q < 0$).

Existența acestei viteze determină o ordonare a mișcării electronilor liberi. Ei vor căpăta o mișcare de ansamblu în sens invers cîmpului electric determinat de tensiunea aplicată, continuînd în același timp să se ciocnească de ionii rețelei. Viteza de deplasare a ansamblului electronilor liberi sub acțiunea cîmpului electric se numește viteză de drift ($v_d$). Pentru calcularea ei este necesar să ținem cont de faptul că între două ciocniri succesive se scurge în medie un același timp $\tau$ și că imediat după fiecare ciocnire viteza de deplasare ordonată a electronilor este nulă. Viteza de drift va fi atunci:

$$\vec{v}_d = \frac{0 + \vec{a}\tau}{2} = \frac{q\tau}{2m}\vec{\xi} = \mu\vec{\xi}. \tag{9}$$

Cu $\mu$ a fost notată cantitatea $q\tau/2m$, care este constantă pentru un anumit material atîta vreme cît valoarea lui $\tau$ nu este influențată de mărimea cîmpului electric.

Un calcul mai atent, în care se ține seama de distribuția vitezelor electronilor liberi, conduce la relația $\mu = q\tau/m$. Absența factorului 2 de la numitor reflectă contribuția sporită la conductivitate a electronilor cu viteze mai mari.

Constanta $\mu$ se numește mobilitate, unitatea ei de măsură în sistemul internațional de unități fiind $m^2/V \cdot s$. Specialiștii preferă utilizarea unui submultiplu al acestei unități și anume $cm^2/V \cdot s$.

Să calculăm acum densitatea curentului electric ($j$) printr-un conductor. Ea reprezintă cantitatea de sarcină electrică ce trece printr-o secțiune de arie unitate într-o secundă. Deoarece în acest timp prin unitatea de arie vor trece toți electronii ce se găsesc într-un cilindru cu aria bazei egală cu unu și cu generatoarea $v_d$, obținem:

$$j = nqv_d = qn\mu\xi = \sigma\xi, \qquad (10)$$

unde $n$ reprezintă densitatea electronilor liberi. Mărimea $\sigma = qn\mu$ se numește conductivitate electrică și se măsoară în $1/\Omega m = S/m$. Relația (10) reprezintă legea lui Ohm care ne spune că, pentru un cîmp electric dat, curentul este cu atît mai mare cu cît valoarea conductivității este mai ridicată.

## CONDUCTIBILITATEA SEMICONDUCTOARELOR

Împărțirea substanțelor în conductoare, semiconductoare și izolatoare se poate face după valoarea lui $\sigma$, luată la temperatura camerei. Metalele sînt substanțe ce au conductivitatea cuprinsă între $10^7$ și $10^6$ S/m, corpurile a căror conductivitate este mai mică de $10^{-8}$ S/m dovedindu-se a fi buni izolatori electrici. Dacă o substanță are conductivitatea cuprinsă între $10^6$ și $10^{-8}$ S/m ea este numită semiconductoare. Acest tip de clasificare nu reflectă însă particularitățile de conducție ale semiconductoarelor. Că asemenea particularități există ne-o demonstrează experiența. Ne dăm seama de aceasta observînd în primul rînd modul în care depinde de temperatură rezistența electrică (fig. 14). Dacă în cazul metalelor rezistența electrică crește liniar odată cu



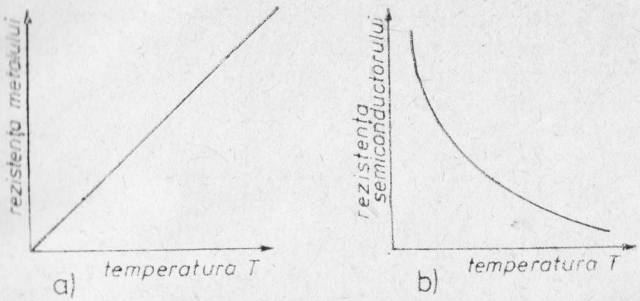



Fig. 14. Dependența de temperatură a rezistenței electrice: a) metale; b) semiconductoare.

mărirea temperaturii (fig. 14a), în cazul semiconductoarelor ea prezintă o scădere exponențială (fig. 14b), în intervale determinate de temperatură.

În al doilea rînd, conductivitatea semiconductoarelor depinde puternic de prezența atomilor străini (a impurităților); o cantitate mică de impurități determină o creștere considerabilă a conductivității, fenomen ce nu se observă în cazul metalelor.

Foarte multe substanțe au proprietăți semiconductoare. Elementele semiconductoare sînt indicate în tabelul 1, dintre

| Grupa / Perioada | III | IV | V | VI | VII |
|---|---|---|---|---|---|
| II | B | C | | | |
| III | | Si | P | S | |
| IV | | Ge | As | Se | |
| V | | Sn | Sb | Te | I |

*TABELUL 1.* Elemente semiconductoare în sistemul periodic.

ele siliciul și germaniul fiind cele mai folosite la ora actuală. Există însă și numeroase substanțe compuse ce manifestă proprietăți semiconductoare (tabelul 2). Dintre acestea cele mai întrebuințate sînt GaAs, GaP, GaAsP, CdS, InSb și PbS.

| Compuși | Tipul | Substanțe semiconductoare |
|---|---|---|
| binari | $A^{I}B^{VII}$ | AgCl, CuBr, KBr, LiF |
| | $A^{II}B^{VI}$ | CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnSe, HgTe |
| | $A^{III}B^{V}$ | GaAs, GaP, AlP, InSb, GaSb |
| | $A^{IV}B^{IV}$ | SiC, SiGe |
| | $A^{I}B^{VI}$ | CuS, CuO, $Cu_2O$ |
| | $A^{IV}B^{VI}$ | PbS, PbSe, PbTe |
| complecși | $A^{III}B_1^{V}B_2^{V}$ | Ga AsP |
| | $A_1^{III}A_2^{III}B^{V}$ | InGaSb |
| | $A_1^{II}A_2^{II}B_1^{VI}B_2^{VI}$ | ZnCdSeTe |

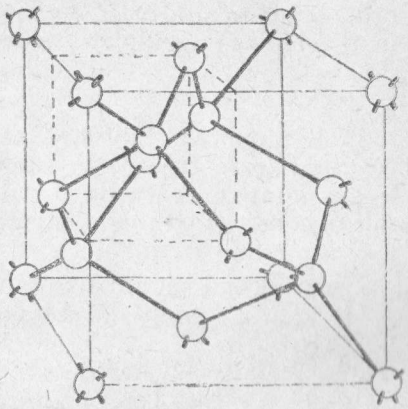
*TABELUL 2.* Exemple de substanțe semiconductoare compuse.

Vom analiza modul în care semiconductoarele conduc curentul electric, luînd ca exemplu siliciul.

Ultimul strat electronic al atomului de siliciu este incomplet, conținînd patru electroni. Legătura dintre atomi este covalentă, un atom neputîndu-se cupla decît cu cei mai apropiați patru atomi vecini prin punerea în comun a cîte unui electron cu fiecare din vecini (fig. 15). La 0 K siliciul pur, cu rețeaua cristalină perfectă, are toate legăturile satisfăcute și prin urmare în el nu există electroni liberi (fig. 16a). Ruperea unei legături, ce are ca efect eliberarea unui electron, necesită un aport energetic care poate fi, de exemplu, de natură termică (fig. 16b). Deci încălzirea siliciului conduce la apariția unor electroni liberi. Aceștia pot participa la conducția electrică, procesul de apariție a lor fiind denumit *generare*. În locurile de unde au plecat electroni rămîn legă-



Fig. 15 — Rețeaua cristalină a siliciului.



turi vacante (nesatisfăcute), numărul lor fiind egal cu cel al electronilor eliberați. O asemenea legătură se poate reface prin captarea unuia din electronii liberi ce se află în apropierea ei. Acest fenomen se numește *recombinare* și observăm că are ca efect atît dispariția unui electron liber, cît și a unei legături nesatisfăcute.

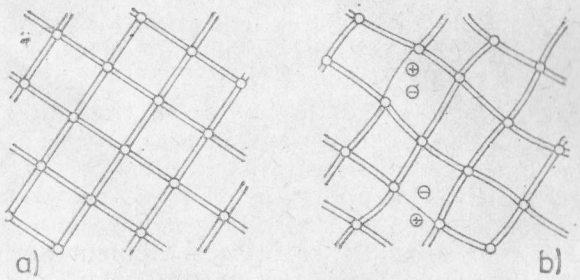



Fig. 16 — a) schema legăturilor covalente ale siliciului; b) producerea electronilor și golurilor datorită agitației termice.

Dacă, în aceste condiții, în semiconductor este prezent un cîmp electric $\vec{\xi}$, electronii liberi vor căpăta o mișcare

ordonată. Densitatea $j_n$ a curentului datorat lor va fi dată de o relație de tipul celei deduse în cazul metalelor (10):

$$\vec{j}_n = q_n \mu_n n_0 \vec{\xi} = \sigma_{0n} \vec{\xi}, \tag{11}$$

indicele $n$ marcînd faptul că mărimile respective se referă la electroni (care transportă sarcină electrică *negativă*). Prin $n_0$ s-a notat concentrația electronilor la echilibru termodinamic în condiții de întuneric, iar $q_n$ reprezintă sarcina electrică a electronului ($q_n < 0$).

În semiconductoare apare însă și un alt tip de conducție. O legătură nesatisfăcută poate fi ocupată nu numai de un electron liber, ci și de un electron dintr-o legătură apropiată, ceea ce echivalează cu o deplasare în cristal a legăturii nesatisfăcute (fig. 17). Cu alte cuvinte ne putem reprezenta

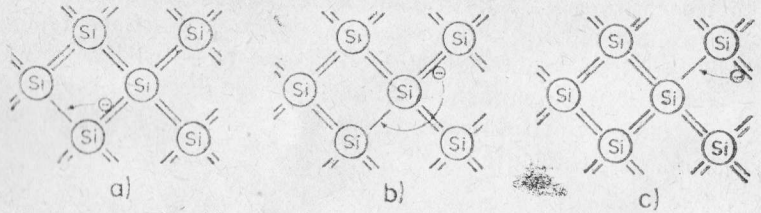



Fig. 17 — Deplasarea întîmplătoare a golurilor în rețeaua cristalină în absența vreunui cîmp electric extern.

acest proces nu ca pe o „deturnare" de electroni din legăturile învecinate, ci ca pe o deplasare, în sens invers, a legăturii vacante. Deoarece unei legături vacante i se poate asocia o sarcină pozitivă, lucrurile se petrec *ca și cum* aceste sarcini pozitive s-ar deplasa prin cristal. Pentru a ușura descrierea fenomenelor de acest tip se utilizează curent noțiunea de *gol*. Golul reprezintă deci o *cvasiparticulă* căreia îi este asociată o sarcină pozitivă elementară ($q_p = -q_n$), mișcarea ei prin cristal fiind întîmplătoare în condițiile echilibrului termodinamic.

La aplicarea cîmpului electric în semiconductor vom avea atît conducție de electroni, cît și de goluri. Dacă vom nota



cu $\mu_p$ mobilitatea golurilor și cu $p_0$ densitatea lor volumică la întuneric (presupunînd realizat echilibrul termodinamic), densitatea curentului datorat golurilor va avea forma:

$$\vec{j}_p = q_p \mu_p p_0 \vec{\xi} = \sigma_{0p} \vec{\xi}, \tag{12}$$

el fiind orientat în sensul cîmpului electric.

Datorită celor două mecanisme de conducție, densitatea totală a curentului electric într-un semiconductor este:

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = (q_n \mu_n n_0 + q_p \mu_p p_0)\vec{\xi} = (\sigma_{0n} + \sigma_{0p})\vec{\xi}, \tag{13}$$

$\sigma_{0n}$ și $\sigma_{0p}$ reprezentînd conductivitatea electrică datorată electronilor și, respectiv, golurilor în condiții de întuneric la echilibru termodinamic.

Semiconductorul pur, considerat de noi, în care numărul de electroni liberi este egal cu numărul de goluri ($n_0 = p_0$) poartă numele de semiconductor *intrinsec*. Relația (13), valabilă în acest caz, ne arată că pentru semiconductorul intrinsec conductivitatea ($\sigma_0$) este suma a doi termeni:

$$\sigma_0 = \sigma_{0n} + \sigma_{0p}. \tag{14}$$

Cu toate că $\mu_p < \mu_n$, conductivitățile datorate electronilor și golurilor au aproximativ același ordin de mărime în semiconductorul intrinsec.

Pe baza datelor numerice prezentate în tabelul 3 se pot calcula rezistivitățile $\rho(\rho = 1/\sigma)$ ale celor trei tipuri de mate-

| Parametrul \ Materialul | Si | Ge | GaAs |
|---|---|---|---|
| Concentrația intrinsecă a purtătorilor ($cm^{-3}$) | $1{,}45 \cdot 10^{10}$ | $2{,}4 \cdot 10^{13}$ | $9 \cdot 10^{6}$ |
| Mobilitatea electronilor ($cm^2/Vs$) | 1 350 | 3 900 | 8 600 |
| Mobilitatea golurilor ($cm^2/Vs$) | 480 | 1 900 | 250 |

*TABELUL 3.* Valori ale unor mărimi fizice specifice semiconductoarelor.

riale semiconductoare atunci cînd se află în stare pură (intrinsecă). La temperatura de 27°C se obțin următoarele valori: 45 Ωcm pentru germaniu, 235 000 Ωcm pentru siliciu, 78 468 000 Ωcm pentru arseniura de galiu (GaAs).

Dacă într-un semiconductor intrinsec se introduc atomi străini (impurități), conductivitatea sa crește. Un astfel de semiconductor se numește *extrinsec*.

În semiconductoare, două tipuri de impurități au o importanță majoră. În cele ce urmează vom exemplifica tot pe cazul siliciului.

*Impuritățile donoare* sînt reprezentate de elemente ale grupei a cincea a sistemului periodic. Ca și siliciul acestea au ultimul strat electronic incomplet, pe el aflîndu-se însă cinci electroni. Dacă un asemenea atom, de exemplu de fosfor, ia locul unui atom de siliciu în rețeaua cristalină, lui îi sînt necesari doar patru electroni pentru realizarea legăturilor covalente în rețea (fig. 18). Al cincilea electron de pe ultimul

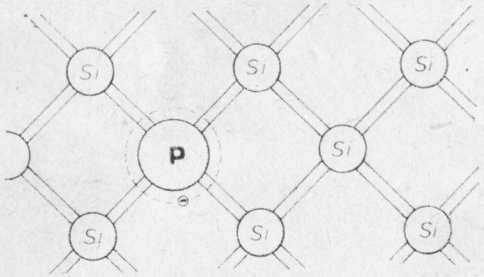



Fig. 18 — Obținerea electronilor liberi de la o impuritate donoare.

strat devine astfel mai slab legat de atomul de fosfor și un mic aport energetic îl va face să devină liber. Deoarece această energie este de aproximativ 0,02 eV, ea poate fi furnizată la temperatura camerei de rețeaua cristalină, electronul al cincilea devenind liber. Atomul de fosfor va deveni ion pozitiv însă cristalul rămîne neutru din punct de vedere electric pentru că electronii eliberați în acest fel nu-l părăsesc. Într-un semiconductor cu impurități donoare numărul electronilor liberi va fi mai mare decît al golurilor ($n > p$) și putem vorbi de existența unor purtători de sarcină liberi majoritari (în acest caz electronii). Spunem că un astfel de semiconductor este de tip *N*.

Atunci cînd locul unui atom de siliciu din rețeaua cristalină este luat de un atom din grupa a treia (de exemplu, bor) situația este alta. Ultimul strat incomplet al borului are trei electroni, iar pentru realizarea legăturilor în rețea sînt necesari patru. Ca urmare, una din legături nu va fi satisfăcută (fig. 19), în cristal apărînd un gol. Impuritățile a căror

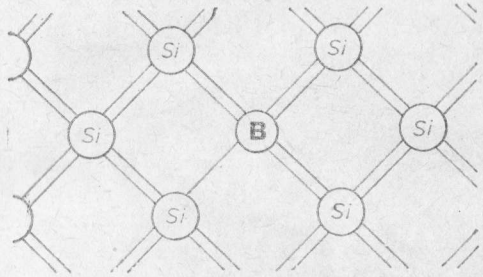



Fig. 19 — Producerea golurilor datorită impurităților acceptoare.

prezență conduce la apariția golurilor se numesc *impurități acceptoare*. Într-un semiconductor cu acceptori numărul golurilor îl depășește pe cel al electronilor liberi ($p > n$). Spunem că în acest caz avem de-a face cu un semiconductor de tip *P*.

## EFECTUL FOTOELECTRIC INTERN

Dispunem acum de elemente suficiente pentru o descriere adecvată a *efectului fotoelectric intern* care mai este cunoscut și sub numele de *efect fotorezistiv*.

Dacă un semiconductor este iluminat, lumina îi traversează suprafața pătrunzînd în volumul său. Adîncimea de pătrundere depinde de natura semiconductorului și de lungimea de undă a luminii. Atunci cînd energia fotonilor este

suficientă are loc eliberarea unor electroni din legăturile lor covalente, mărindu-se astfel numărul de purtători liberi ce pot participa la conducție. Deoarece ruperea unei legături înseamnă producerea atît a unui electron liber cît și a unui gol, acest tip de generare va determina aceeași variație a numărului de electroni liberi și a numărului de goluri ($\Delta n = \Delta p$). În aceste condiții (absorbție fundamentală) vom putea scrie că:

$$n = n_0 + \Delta n \tag{15}$$

$$p = p_0 + \Delta p, \tag{16}$$

$n$ și $p$ reprezentînd concentrația electronilor liberi și, respectiv, a golurilor, în condițiile de *neechilibru* datorate iluminării.

Conductivitatea electrică se va scrie în această situație sub forma:

$$\sigma = q_n \mu_n (n_0 + \Delta n) + q_p \mu_p (p_0 + \Delta p) = \sigma_0 + \sigma_{fc}, \tag{17}$$

unde $\tau_{fc}$ are expresia:

$$\sigma_{fc} = q_n \mu_n \Delta n + q_p \mu_p \Delta p \tag{18}$$

și poartă numele de *fotoconductivitate*.

Rezultatele experimentale indică o variație a fotoconductivității cu timpul de iluminare a semiconductorului. Alura acestei dependențe este redată în figura 20 prin curba continuă. Se observă o „saturare" care se instalează după ce

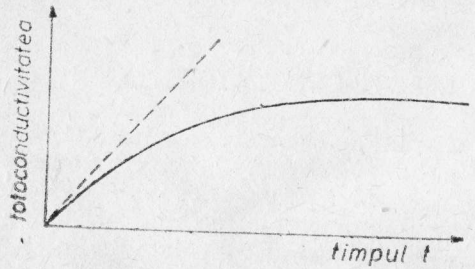



Fig. 20 — Dependența fotoconductivității unui semiconductor de timpul de iluminare.



semiconductorul a fost continuu iluminat un anumit interval de timp. Dacă electronii liberi și golurile ce apar sub acțiunea luminii nu ar interacționa, recombinîndu-se, fotoconductivitatea ar trebui să crească proporțional cu timpul de iluminare (dreapta cu linie întreruptă din figura 20). Însă recombinarea dintre electronii liberi și goluri face ca la un anumit moment să se realizeze un echilibru dinamic. Atunci cînd numărul purtătorilor liberi în exces (electroni și goluri) atinge o anumită valoare, numărul perechilor fotogenerate devine egal cu cel al perechilor ce se recombină, concentrațiile electronilor liberi și golurilor ajungînd astfel la valori constante în timp. O astfel de situație se numește *stare staționară*.

Intervalul temporal, după care fotoconductivitatea atinge valoarea de saturație, va fi, prin urmare, legat de durata de viață a purtătorilor fotogenerați care, la rîndul ei, depinde de viteza cu care se recombină purtătorii liberi. Timpul de viață al purtătorilor de sarcină este unul din parametrii importanți ai oricărei substanțe semiconductoare. În cele ce urmează vom avea ocazia să revenim asupra acestei noțiuni.

Efectul fotoelectric intern poate fi evidențiat cu montajul din figura 21. Galvanometrul $G$ indică o creștere a curentului din circuit atunci cînd un fascicul de lumină este îndreptat

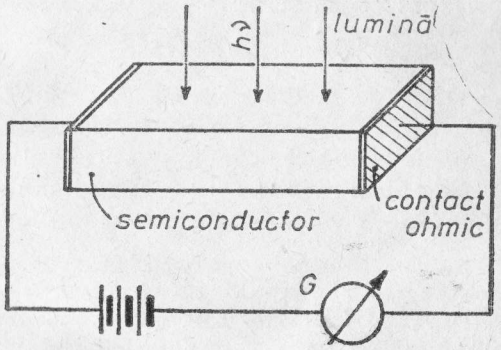



Fig. 21 — Circuit pentru evidențierea fotoconductivității în semiconductoarele cu conductivitate intrinsecă mică.

spre una din suprafețele libere ale semiconductorului. Curentul ce apare în circuitul din figura 21 va reprezenta suma a două componente: un curent $I_0$ datorat purtătorilor liberi generați termic (numit curent de întuneric) și un curent $I_{fc}$ datorat purtătorilor liberi generați sub acțiunea luminii (fotocurent).

Să calculăm valoarea fotocurentului atunci cînd semiconductorului i se aplică o diferență de potențial $V$, iar pe suprafața lui cade un flux luminos constant $\Phi$. Deoarece fotocurentul se obține din înmulțirea densității de curent cu secțiunea $S$ a semiconductorului, $I_{fc} = j_{fc}S$, vom calcula întîi pe $j_{fc}$. Valoarea acestei densități de curent va fi:

$$j_{fc} = \sigma_{fc}\xi = (q_n\mu_n\Delta n + q_p\mu_p\Delta p)\xi. \tag{19}$$

Numărul de purtători liberi generați sub acțiunea luminii trebuie să depindă de viteza de generare ($G$) și de timpul de viață ($\tau$). Cu cît vor fi generați mai mulți purtători în unitatea de timp și cu cît timpul de viață va fi mai mare, cu atît vom avea mai mulți purtători liberi fotogenerați capabili să fie orientați de cîmpul electric. Dacă vom presupune că vitezele de generare și timpii de viață au aceleași valori în cazul electronilor și golurilor ($G_n = G_p = G$; $\tau_n = \tau_p = \tau$) vom putea scrie:

$$\Delta n = \Delta p = G\tau. \tag{20}$$

La rîndul ei viteza de generare trebuie să depindă de fluxul luminos și de gradul în care semiconductorul absoarbe lumina. O absorbție mai puternică va conduce la o viteză de generare mai mare, același efect avîndu-l și creșterea fluxului luminos. Viteza de generare se va putea deci scrie sub forma:

$$G = \eta\alpha\Phi, \tag{21}$$

$\alpha$ fiind coeficientul de absorbție a luminii, iar $\eta$ probabilitatea ca un foton absorbit să genereze o pereche electron-gol. Această probabilitate poartă numele de randament cuantic al generării.



Avînd în vedere modul de definire al vitezei de drift [rel. (9)] putem scrie:

$$\xi = \frac{v_{dn}}{\mu_n} = \frac{v_{dp}}{\mu_p} \tag{22}$$

$v_{dn}$ și $v_{dp}$ fiind vitezele de drift pentru electroni și, respectiv, pentru goluri.

Timpul în care un purtător parcurge distanța $l$ cu viteza de drift poartă numele de timp de tranzit ($t_r$). Deoarece între electrozi se mișcă atît electroni cît și goluri vom avea de-a face cu doi timpi de tranzit diferiți: $t_{rn}$ pentru electroni și $t_{rp}$ pentru goluri. Ei pot fi calculați din relațiile:

$$t_{rn} = \frac{l}{v_{dn}}; \quad t_{rp} = \frac{l}{v_{dp}}. \tag{23}$$

Vitezele de drift fiind diferite, timpii de tranzit pentru electroni și goluri vor avea valori diferite.

Relațiile 19—23 ne permit să scriem densitatea fotocurentului sub forma:

$$j_{fc} = q_p\left(\frac{1}{t_p} + \frac{1}{t_n}\right)\tau\eta\alpha\Phi l. \tag{24}$$

Cantitatea

$$A = \tau\left(\frac{1}{t_p} + \frac{1}{t_n}\right) \tag{25}$$

poartă numele de coeficient de amplificare.

Valoarea fotocurentului va fi dată de expresia

$$I_{fc} = q_pA\eta\alpha\Phi Sl. \tag{26}$$

În cazul în care $\sigma_{fc} \gg \sigma_0$ pentru studiul experimental al efectului fotoelectric intern se poate utiliza chiar montajul din figura 21. Curentul citit pe instrumentul de măsură poate fi identificat cu fotocurentul deoarece în acest caz curentul de întuneric are o valoare mult mai mică decît a fotocurentului propriu-zis.

În cazul contrar ($\sigma_{fc} \ll \sigma_0$), valabil pentru semiconductoarele a căror conductivitate electrică este foarte mare,

fotocurentul poate fi măsurat printr-o tehnică de compensare. Schema montajului ce se utilizează în acest caz este prezentată în figura 22. Ținînd semiconductorul la întuneric și aplicîndu-i tensiunea dată de sursa $S_1$, prin rezistorul $R$ va circula un curent ($I_0$) ce va determina o cădere de tensiune $U = I_0 \cdot R$ pe $R$. Prin mișcarea cursorului $C$ pe

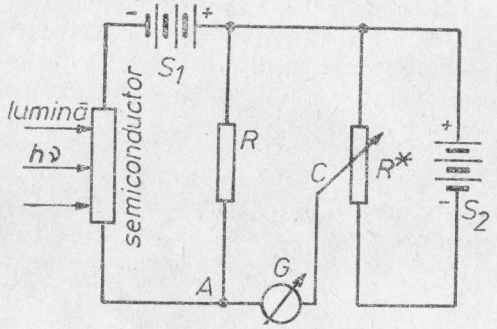



Fig. 22 — Montaj de compensare utilizat pentru măsurarea fotocurentului în semiconductoarele cu conductivitate mare.

reostatul $R^*$, se poate găsi o poziție pentru care potențialul în punctul $A$ să fie același cu al punctului $C$. Deoarece în această situație diferența de potențial dintre punctele $A$ și $C$ este nulă, acul galvanometrului $G$ nu va avea nici o deviație, indicînd zero. La iluminarea semiconductorului, curentul prin rezistorul $R$ va avea valoarea $I_0 + I_{fc}$, conducînd la o cădere de tensiune $U_1 = (I_0 + I_{fc})R$, mai mare decît în situația precedentă. Potențialul punctului $A$ se va schimba, iar galvanometrul va indica o tensiune a cărei valoare va fi $U_1 - U = I_{fc}R$. Deoarece valoarea lui $R$ este cunoscută, fotocurentul poate fi determinat imediat.

Experimental se constată că valoarea fotocurentului datorat efectului fotoelectric intern depinde de lungimea de undă a luminii. Dacă lungimea de undă depășește o anumită



valoare $\lambda_{max}$, atunci $I_{fc} = 0$, ceea ce înseamnă că efectul nu se mai produce. Din datele experimentale se deduce că:

$$\lambda_{max} = \frac{h \cdot c}{E_g}, \tag{27}$$

$h$ fiind constanta lui Planck, $c$ — viteza luminii, iar $E_g$ — o mărime cu dimensiuni de energie, a cărei valoare depinde de natura semiconductorului.

După cum vom vedea în cele ce urmează, $E_g$ este una din mărimile importante ce caracterizează materialele semiconductoare, ea reprezentînd lărgimea zonei energetice interzise.

## FOTOREZISTORUL

Fotorezistorul este un dispozitiv optoelectronic pasiv, a cărui funcționare se bazează în exclusivitate pe efectul fotoelectric intern. În funcție de materialul semiconductor din care este realizat, sensibilitatea lui spectrală poate merge din domeniul ultraviolet pînă în infraroșul apropiat.

În figura 23 a se prezintă schematic alcătuirea unui fotorezistor. Pe un suport izolator este depus un strat de material semiconductor la extremitățile căruia se realizează, prin depuneri metalice, două contacte ohmice pe care se lipesc terminalele dispozitivului. Pentru a obține o valoare mai mare a rezistenței la întuneric, stratul de material semiconductor se dispune sub formă ondulată (fig. 23 b).

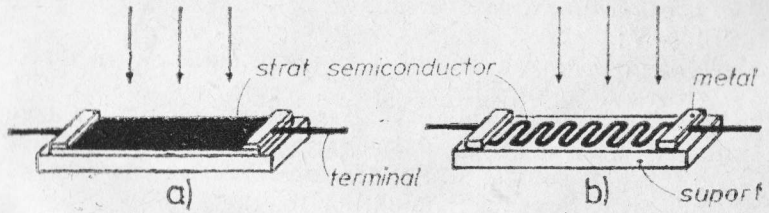



Fig. 23 — Tipuri de fotorezistoare: a) cu strat semiconductor depus uniform; b) cu strat semiconductor spiralat.

La realizarea unor fotorezistoare cu răspuns mare în domeniul vizibil se utilizează sulfura de cadmiu (CdS) și selenura de cadmiu (CdSe). Fotorezistoarele realizate pe bază de sulfură de plumb (PbS) și selenură de plumb (PbSe) au răspunsul maxim în infraroșu (la 2,5 μm și respectiv 4 μm).

Suprafața fotosensibilă a fotorezistoarelor poate varia între 1 mm² și cîțiva centimetri pătrați. Dispozitivele se încapsulează în plastic, metal, ceramică sau sticlă.

Simbolurile utilizate pentru reprezentarea fotorezistoarelor în schemele electronice sînt indicate în figura 24 a, iar modul de utilizare a acestora într-un montaj în figura 24 b.

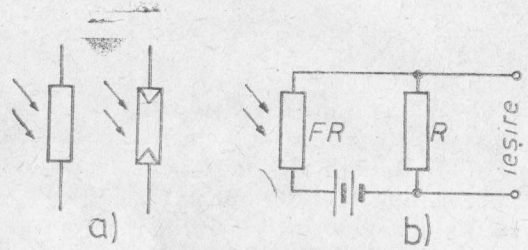



Fig. 24 — a) Simboluri pentru fotorezistoare; b) conectarea unui fotorezistor într-un circuit electric.

Parametrii ce caracterizează un fotorezistor realizat dintr-un anumit material semiconductor sînt următorii:

1 — *rezistența electrică la întuneric* (iluminarea = $E = 0$) — are valori mari, putînd ajunge la sute de megohmi;

2 — *tensiunea maximă admisă la borne* — este de obicei peste 100 V;

3 — *puterea maximă disipată* — poate fi cuprinsă între zeci și sute de miliwați;

4 — *sensibilitatea la lumină* — reprezintă raportul dintre variația $\Delta I$ a curentului și variația $\Delta E$ a iluminării la o tensiune constantă. Se măsoară în mA/lx și are valori mai mari în cazul iluminărilor mici;

5 — *sensibilitatea spectrală* — depinde de natura materialului semiconductor utilizat (fig. 25). Trebuie să remarcăm că lungimea de undă la care se atinge maximul sensibilității



spectrale poate fi diferită la dispozitive care utilizează același material semiconductor. Există, de exemplu, fotorezistoare realizate cu CdS ce pot avea maximul sensibilității spectrale la 550 nm și nu la 520 nm cum se indică în figura 25 a. O asemenea deplasare a maximului se poate realiza prin depunerea de straturi dielectrice (antireflectante) pe suprafața materialului semiconductor utilizat sau prin impurificare controlată a acestuia.

În cazul fotorezistoarelor realizate dintr-un amestec de două materiale semiconductoare, poziția maximului sensibilității spectrale depinde de proporțiile în care sînt amestecate. Acest lucru este evidențiat în figura 25 (curbele b, c, d, e) pentru cazul amestecului CdS-CdSe.

Alura curbelor sensibilității spectrale a fotorezistoarelor este asemănătoare cu cea a celulelor fotoelectrice, însă cauzele ce determină această alură sînt diferite. În cazul lungimilor de undă mici coeficientul de absorbție a luminii este foarte mare, fotogenerarea purtătorilor de sarcină făcîndu-se într-un strat foarte subțire sub suprafața iluminată. Cu cît numărul de defecte al acestei suprafețe este mai mare (și în cazul dis-

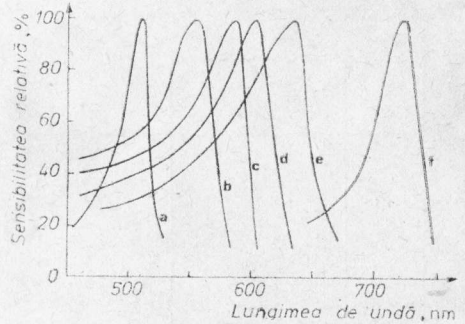



Fig. 25. — Sensibilitatea spectrală relativă a fotorezistoarelor cu CdS și CdSe în funcție de compoziția amestecului: a) 100% CdS; b) 78% CdS + 22% CdSe; c) 67% CdS + 33% CdSe; d) 54% CdS + + 46% CdSe; e) 37% CdS + 63% CdSe; f) 100% CdSe.

pozitivelor comerciale el este suficient de ridicat), timpul de viață al acestor purtători este mai mic, ei dispărînd rapid prin recombinare. Ca urmare, numărul purtătorilor liberi disponibili pentru conducție se micșorează extrem de mult, fotocurentul va avea o valoare foarte mică, iar sensibilitatea spectrală va fi redusă.

Micșorarea sensibilității la lumina cu lungime de undă mare este determinată de slaba interacțiune a fotonilor corespunzători cu materialul semiconductor, aceștia nemaiavînd energie suficientă pentru producerea unui număr mare de purtători de sarcină liberi.

6 — *timpii de răspuns* — indică rapiditatea creșterii sau descreșterii conductanței electrice (inversul rezistenței) la aplicarea și respectiv întreruperea unui impuls luminos. Dacă unui fotorezistor i se aplică un puls luminos dreptunghiular (creștere bruscă la valoarea maximă și scădere bruscă, după un anumit timp, la valoarea zero) conductanța variază ca în figura 26. Se definește timpul de creștere al conductanței ($t_r$) ca fiind intervalul temporal cuprins între momentul $t_1$ al aplicării impulsului luminos și momentul $t_2$ cînd conductanța este 67% din valoarea

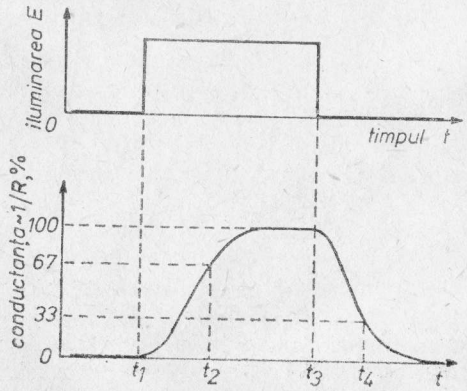



Fig. 26 — Dependența de timp a inversului rezistenței electrice în cazul unui fotorezistor.



sa maximă. Timpul de scădere ($t_f$) este intervalul temporal dintre momentul încetării iluminării ($t_3$) și momentul ($t_4$) la care conductanța scade la 33% din valoarea maximă. Timpii de răspuns ai fotorezistoarelor sînt relativ mari, de ordinul zecilor de milisecunde. Din acest motiv se spune că fotorezistoarele au inerție electrică mare.

7 — *coeficientul de temperatură* — indică modificarea procentuală a valorii rezistenței cînd, la o iluminare dată, se schimbă temperatura dispozitivului. Valorile lui sînt mari și diferă mult de la un tip de fotorezistor la altul.

Funcționarea fotorezistoarelor nu depinde de sensul tensiunii electrice aplicate. Valoarea curentului (la o tensiune dată) depinde de nivelul de iluminare $E$ (fig. 27). Aceste

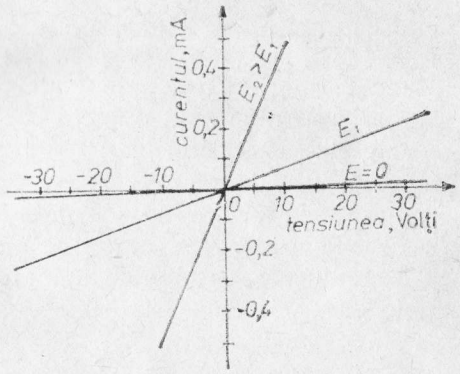



Fig. 27 — Caracteristici curent-tensiune pentru un fotorezistor la două nivele de iluminare.

dispozitive au sensibilitate mare la lumină, pot suporta tensiuni mari și au un preț de cost scăzut.

Fotorezistoarele se utilizează în măsurători optice, automatizări, instalații de protecție a muncii etc. Deoarece sensibilitatea lor spectrală poate fi adusă aproape de cea a ochiului uman, fotorezistoarele sînt utilizate în fotometrie (la realizarea luxmetrelor).

# ELEMENTE DE FIZICA SEMICONDUCTOARELOR

## BENZI ENERGETICE ÎN CORPUL SOLID

Înțelegerea caracteristicilor electrice și optice ale corpurilor solide necesită cunoașterea modului în care structura lor influențează proprietățile electronilor din edificiile atomice.

Un corp solid este un ansamblu de atomi dispuși într-o anumită ordine, cu distanțe bine determinate între nucleele atomice. Forțele de atracție care asigură stabilitatea unui asemenea ansamblu determină modificări în poziția și structura nivelelor energetice ale electronilor.

Într-un atom izolat, electronilor le corespund nivele energetice discrete sau, cu alte cuvinte, energia lor poate lua doar anumite valori. Pentru a avea o imagine a acestei situații vom lua ca exemplu cel mai simplu atom, de hidrogen, care are un singur electron. Valorile posibile $E_n$ ale energiei acestui electron sînt date de relația

$$E_n = -\frac{mq^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \qquad (28)$$

unde $m$ reprezintă masa electronului, $q$ — valoarea sarcinii elementare, $\varepsilon_0$ — permitivitatea vidului, $h$ — constanta lui Planck, iar $n$ — numărul cuantic principal ce poate lua orice valoare naturală (1, 2, 3, ..). Semnul minus indică faptul că este vorba de o energie de legătură, adică pentru scoaterea din atom a electronului ce se află în starea caracterizată prin numărul cuantic $n$ este necesar ca din exterior să i se comunice



energia $E_n$. În figura 28 sînt reprezentate aceste nivele energetice pînă la $n = 7$.

Relația (28) ne permite să afirmăm că energia electronului legat este cuantificată, ea neputînd lua orice valoare între $E_1$ (starea fundamentală) și zero (electron scos din edificiul atomic). Se observă că energia necesară trecerii de pe un nivel energetic inferior pe unul superior este cu atît mai mică cu cît salturile se fac între nivele mai înalte, adică cu valori mai mari ale numărului cuantic principal.

Atunci cînd se ia în considerație și momentul cinetic al electronului datorat mișcării sale în jurul nucleului se ajunge la concluzia că nivelele energetice suferă o despicare: în locul unui singur nivel apar o serie de subnivele foarte apropiate între ele. Stării caracterizate prin numărul cuantic principal

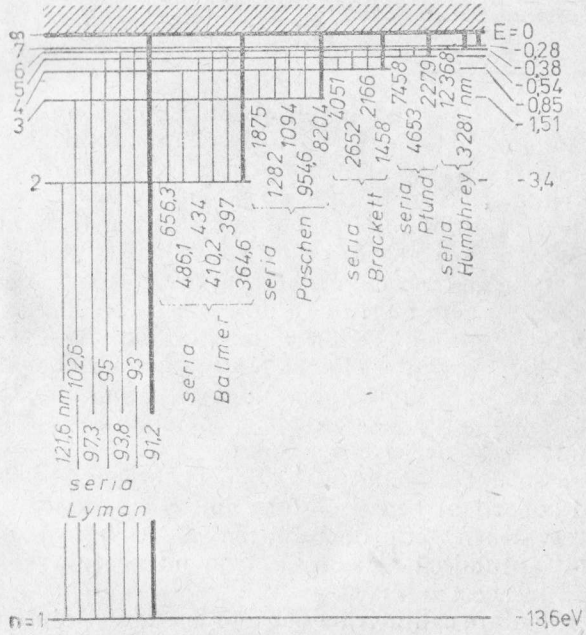



Fig. 28 — Nivele energetice și serii spectrale ale atomului de hidrogen.

$n$ îi vor corespunde $2n - 1$ nivele energetice, situație prezentată calitativ în figura 29.

Considerațiile prezentate rămîn valabile și pentru atomii cu mai mulți electroni.

În cazul unui corp solid, această situație trebuie să prezinte aspecte noi, datorită condițiilor diferite în care se află

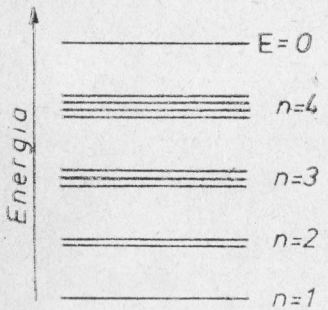



Fig. 29 — Despicarea nivelelor energetice ale electronului în atomul de hidrogen.

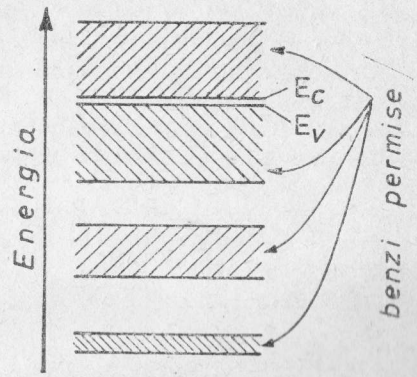
atomii și electronii din învelișul lor. Oricare atom al unui corp solid interacționează cu toți ceilalți atomi ai lui, ceea ce conduce la o despicare suplimentară a nivelelor energetice ale electronilor. Numărul de nivele energetice ce corespund unui nivel al atomului izolat este cu atît mai mare cu cît sînt mai numeroși atomii ce formează corpul solid. Pentru a avea o „imagine" a numărului de nivele ce apar, să ne amintim că într-un centimetru cub dintr-un corp solid sînt aproximativ $10^{22}$ atomi. Datorită acestei îndesiri a nivelelor permise, distanța dintre ele este foarte mică astfel încît putem considera că, între limitele permise pentru un anumit număr cuantic, energia variază practic continuu. Se formează în acest fel *benzile de energie permisă*.

Între nivelul cel mai ridicat al unei benzi permise și nivelul cel mai coborît al benzii permise imediat superioare, există un interval energetic denumit *bandă energetică interzisă*, datorită faptului că nici un electron nu poate avea energia cuprinsă în acest interval.

O prezentare calitativă a benzilor energetice dintr-un solid este dată în figura 30.



Fig. 30 — Benzi energetice ale unui corp solid.




O concluzie foarte importantă la care ajunge teoria este aceea că lărgimea benzilor energetice nu depinde de numărul atomilor ce formează corpul solid, ci doar de natura lor și de distanțele care îi separă.

Trei dintre benzile energetice ale unui corp solid prezintă o importanță deosebită pentru fenomenele electrice. Este vorba de ultima și penultima bandă energetică permisă și de banda interzisă care le separă. Vom nota cu $E_c$ energia corespunzătoare nivelului cel mai coborît al ultimei benzi permise și cu $E_v$ energia corespunzătoare nivelului cel mai ridicat al penultimei benzi permise. Deoarece intervalul energetic al penultimei benzi permise corespunde electronilor de valență, această bandă de energie a primit numele de *bandă de valență*. Electronii a căror energie este mai mare ca $E_c$ sînt electroni ce pot participa la conducția electrică și din acest motiv ea se numește *bandă de conducție*.

Lărgimea $E_g$ a benzii interzise va fi:

$$E_g = E_c - E_v, \tag{29}$$

fiecare substanță avînd o valoare bine precizată a acestui interval energetic. Menționăm că lărgimea benzii interzise depinde de temperatură, ea îngustîndu-se odată cu creșterea temperaturii. La temperatura camerei, lărgimea zonei inter-

zise este de 0,67 eV la germaniu, de 1,11 eV la siliciu și de 1,40 eV la arseniura de galiu.

Valoarea lui $E_g$ reprezintă un criteriu calitativ de clasificare a substanțelor din punct de vedere al conductibilității electrice. La corpurile conductoare banda de conducție se suprapune parțial, chiar la temperatura de 0 K, peste banda de valență; pentru ele nu există bandă energetică interzisă (fig. 31 a). Substanțele ce au lărgimea benzii interzise mai mare de 2—3 eV se dovedesc a fi buni izolatori electrici, iar cele pentru care $E_g \approx 2$—3 eV manifestă proprietăți semiconductoare (fig. 31 c, b).

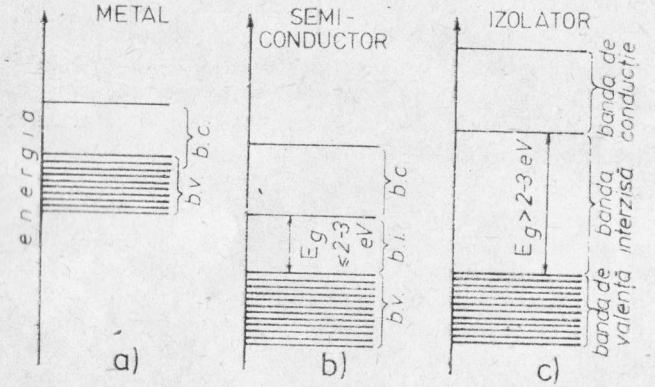



Fig. 31 — Benzi energetice în corpul solid: a) metale; b) semiconductoare; c) dielectrici.

Putem transpune acum în limbajul benzilor energetice considerațiile făcute anterior asupra conductibilității electrice a semiconductoarelor.

În cazul unui *semiconductor intrinsec* aflat la 0 K, toate legăturile fiind satisfăcute, nu vor exista electroni liberi și, prin urmare, nici un electron nu va avea energia mai mare decît $E_c$. Spunem că în acest caz banda de conducție este goală, toți electronii aflîndu-se în banda de valență. Dacă se mărește temperatura, unele legături se rup, apar goluri.



iar electronii ce participau la realizarea lor devin liberi, avînd deci energia cel puțin egală cu $E_c$. În acest caz spunem că electronii au trecut din banda de valență în cea de conducție. Plecarea unui electron din banda de valență face ca în ea să apară un gol; în banda de conducție vor exista electroni, iar în cea de valență goluri, concentrația lor în volumul cristalului fiind aceeași ($n_0 = p_0$) (fig. 32). Se observă că $E_g$

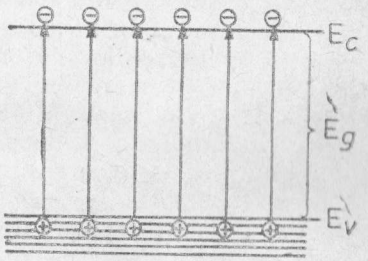



Fig. 32 — Generarea purtătorilor de sarcină în reprezentarea benzilor energetice.

reprezintă în acest caz energia minimă necesară trecerii unui electron din banda de valență în banda de conducție.

În *semiconductoarele extrinseci* rolul determinant în apariția purtătorilor liberi îl au impuritățile. Prezența unor impurități în materialul semiconductor determină apariția unor nivele energetice permise în interiorul benzii interzise. Nivelele donorilor sînt foarte apropiate de banda de conducție (fig. 33 a), iar cele introduse de acceptori sînt foarte apropiate de banda de valență (fig. 33 b); distanțele lor față de marginile benzilor respective sînt de aproximativ 0,05 eV.

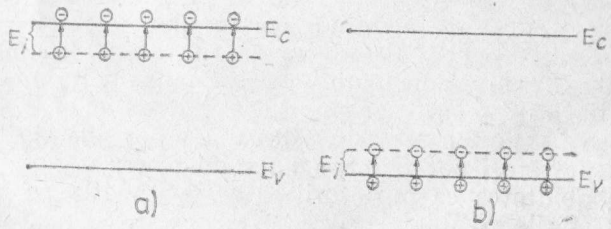



Fig. 33 — Nivele introduse de impurități în banda interzisă; a) nivel datorat unei impurități donoare; b) nivel datorat unei impurități acceptoare.

În cazul unui semiconductor cu impurități donoare, electronilor de pe nivelul donor le este necesară o energie mult mai mică decît celor din banda de valență pentru a trece în banda de conducție. Deoarece golurile nu apar *decît* în banda de valență, rezultă că în acest caz numărul electronilor liberi va fi mai mare decît al golurilor, conducția electrică fiind datorată în principal electronilor (semiconductor de tip $N$).

Dacă semiconductorul este impurificat cu impurități acceptoare, electronilor din banda de valență le este mai ușor să ajungă pe nivelul de impuritate decît în banda de conducție. În acest caz numărul electronilor liberi va fi mai mic decît al golurilor, iar conducția electrică se va datora în principal golurilor (semiconductor de tip $P$).

Atunci cînd în semiconductor se găsesc atît impurități donoare, cît și acceptoare, tipul de conductivitate este determinat de impuritatea ce are concentrația mai mare. Dacă notăm cu $N_D$ concentrația donorilor și cu $N_A$ concentrația acceptorilor, semiconductorul va fi de tip $N$ dacă $N_D > N_A$; ($n \approx N_D - N_A$) și de tip $P$ atunci cînd $N_A > N_D$; ($p \approx N_A - N_D$). În cazul în care $N_D = N_A$ se spune că semiconductorul este *compensat*, el comportîndu-se aproape la fel ca atunci cînd nu conține impurități.

## CONCENTRAȚIA PURTĂTORILOR DE SARCINĂ

Cunoașterea concentrațiilor purtătorilor de sarcină liberi este esențială pentru descrierea cantitativă a fenomenelor ce au loc în semiconductoare. Pentru a putea determina concentrația lor este necesar să știm următoarele:

— numărul stărilor energetice în care se pot afla purtătorii;
— cîți purtători pot fi într-o anumită stare;
— probabilitatea ca purtătorii să se poată afla pe fiecare din stările posibile.

Deoarece energia electronilor variază aproape continuu în benzile energetice permise, pentru aflarea numărului de stări posibile este util să se lucreze cu *densitatea de stări*. Prin densitate de stări se înțelege numărul posibil al stărilor din



intervalul energetic unitate, calculele arătînd că această mărime depinde de energia $E$ a purtătorilor. Densitatea stărilor pentru electronii din banda de conducție ($N_n$) este dată de relația:

$$N_n(E) = C_n(E - E_c), \tag{30}$$

iar densitatea stărilor corespunzătoare absenței electronilor din banda de valență (adică densitatea stărilor pentru goluri) are expresia:

$$N_p(E) = C_p(E_v - E). \tag{31}$$

În relațiile (30) și (31) $C_n$ și $C_p$ sînt mărimi constante (valorile lor fiind diferite) și remarcăm prezența mărimilor $E_c$ și $E_v$, adică a limitei energetice inferioare a benzii de conducție și a limitei energetice superioare a benzii de valență.

Numărul de electroni ce se pot găsi într-o anumită stare energetică rezultă din principiul lui Pauli — este vorba de cel mult doi electroni cu valori diferite ale variabilei de spin ($+1/2$ și, respectiv $-1/2$), iar pentru a ști probabilitatea ca un electron să se poată afla într-o stare energetică dată trebuie să facem apel la una din *statisticile cuantice*.

Teoriile statistice se utilizează atunci cînd numărul particulelor ce alcătuiesc un sistem este foarte mare, deoarece în această situație nu se mai poate urmări individual comportarea fiecăreia. Aceste teorii își propun să determine probabilitatea ca particulele sistemului, aflat în echilibru termodinamic, să aibă o anumită energie.

Statistica clasică (Maxwell — Boltzmann) acordă individualitate particulelor și acceptă ideea că într-o stare dată pot fi oricîte particule. Spre deosebire de ea, statisticile cuantice consideră lipsită de sens acordarea de individualitate unor particule identice; cu alte cuvinte, nu putem ști *care* dintre particule se bucură de o anumită proprietate, ci doar că *unele* o pot avea și *altele* nu.

Există două statistici cuantice: statistica Fermi-Dirac care se aplică particulelor cu spin semiîntreg și statistica Bose-Einstein aplicabilă particulelor cu spin întreg. În cadrul statisticii Bose-Einstein nu este valabil principiul lui

Pauli și din acest motiv expresia ce dă probabilitatea de ocupare a unei anumite stări energetice de către bosoni va diferi de cea corespunzătoare ocupării cu fermioni a aceleiași stări.

În cazul electronilor va trebui să aplicăm deci rezultatele statisticii Fermi-Dirac, conform căreia probabilitatea de ocupare a unei stări cu energia $E$ la temperatura $T$ într-un sistem aflat la echilibru termodinamic este:

$$f_0(E, T) = \frac{1}{e^{\frac{E-F}{kT}} + 1}, \tag{32}$$

$k$ fiind constanta lui Boltzmann, iar $F$ — o mărime cu dimensiuni de energie ce poartă numele de energia (nivelul) Fermi.

Din relația (32) deducem că dacă $E = F$ atunci $f_0 = 1/2$, oricare ar fi temperatura sistemului (fig. 34).

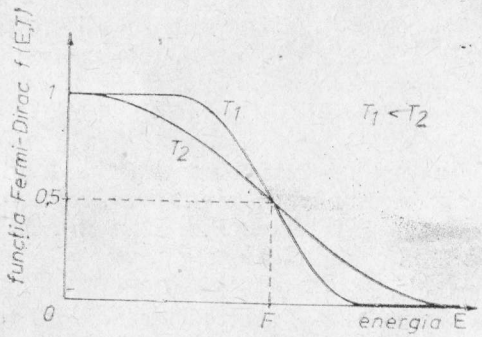



Fig. 34 — Dependența de energie a funcției Fermi-Dirac.

Avînd în vedere aceste considerații, concentrația electronilor liberi ($n$) va fi dată de relația:

$$n = 2\int_{E_c}^{\infty} f_0(E, T) N_n(E) \mathrm{d}E, \tag{33}$$



Se observă că $n$ va depinde de temperatură și de poziția nivelului Fermi (valoarea lui $F$), adică $n = n(T, F)$.

Pentru calculul concentrației golurilor vom găsi o relație analoagă, deosebirea fiind că în locul lui $f_0$ în ea va apare cantitatea $(1 - f_0)$, deoarece existența unui gol este condiționată de absența unui electron, iar integrala se efectuează de la $-\infty$ la $E_v$. Prin urmare și $p$ va avea aceeași dependență funcțională ca $n$, adică $p = p(T, F)$.

Vom aminti că în cazul unui semiconductor intrinsec nivelul Fermi este aproximativ la jumătatea distanței dintre $E_v$ și $E_c$, că poziția lui în zona interzisă depinde de cantitatea de impurități din semiconductor și că un semiconductor se numește *nedegenerat*, atunci cînd distanța dintre $F$ și $E_c$ (respectiv dintre $F$ și $E_v$) este cel puțin $kT$ ($\approx$0,0259 eV, la 27°C), nivelul Fermi fiind în zona interzisă.

În cazul în care distanța dintre nivelul Fermi, aflat în zona interzisă, și una din limitele zonelor energetice permise este mai mică decît $kT$ sau în cazul în care acest nivel se găsește în zona de conducție sau în cea de valență semiconductorul se numește *degenerat*. Asemenea situații apar atunci cînd semiconductorul este foarte puternic impurificat. Introducerea unui număr mare de impurități donoare poate face ca nivelul Fermi să fie situat deasupra lui $E_c$, în timp ce prezența unui număr mare de impurități acceptoare poate face ca nivelul Fermi să se situeze sub $E_v$.

Pentru un semiconductor nedegenerat, aflat în condiții de echilibru termodinamic, se constată că produsul dintre concentrația electronilor și cea a golurilor este constant, valoarea lui fiind egală cu pătratul concentrației $n_i$ pe care o au purtătorii atunci cînd semiconductorul este intrinsec:

$$np = n_i^2. \tag{34}$$

Am arătat că atît concentrația electronilor liberi, cît și cea a golurilor depind de valoarea lui $F$, adică de poziția nivelului Fermi. Calculul lui $F$ se poate face pe baza așa-numitei *ecuații a neutralității electrice*.

Să presupunem că în materialul semiconductor există atît impurități donoare, cît și acceptoare cu concentrațiile

$N_D$ și, respectiv, $N_A$. O parte din purtătorii liberi provin de la atomii de impuritate care devin astfel ioni pozitivi (donorii) sau ioni negativi (acceptorii), iar altă parte provin de la atomii semiconductorului pe seama energiei termice a rețelei cristaline. Într-un astfel de semiconductor impurificat vom avea electroni liberi, goluri, ioni negativi și ioni pozitivi.

Vom nota cu $N_A^-$ concentrația ionilor negativi proveniți din ionizarea acceptorilor și cu $N_D^+$ concentrația ionilor pozitivi proveniți din ionizarea donorilor.

Deoarece semiconductorul este *neutru* din punct de vedere electric, suma sarcinilor electrice din interiorul lui trebuie să fie nulă sau, cu alte cuvinte, concentrația sarcinilor negative trebuie să fie egală cu cea a sarcinilor pozitive, adică:

$$n + N_A^- = p + N_D^+. \tag{35}$$

Relația (35) reprezintă ecuația neutralității electrice. Ea se poate scrie și sub altă formă, în care apar direct concentrațiile atomilor de impuritate.

Dacă cu $n_d$ vom nota concentrațiile electronilor de pe nivelul donor, iar cu $p_a$ concentrația golurilor de pe nivelul acceptor, vom putea scrie:

$$N_D^+ = N_D - n_d; \qquad N_A^- = N_A - p_a \tag{36}$$

iar ecuația (35) devine:

$$n + n_d - p - p_a = N_D - N_A. \tag{37}$$

Rezolvarea ecuației (37) în diverse cazuri permite aflarea poziției nivelului Fermi, ceea ce dă posibilitatea calculări concentrațiilor purtătorilor liberi. În fiecare situație se poate calcula numai concentrația unui singur tip de purtători, din relația (34) rezultînd imediat concentrația celuilalt tip.

Pentru un semiconductor nedegenerat concentrațiile purtătorilor liberi sînt date de următoarele relații:

$$n = N_c e^{\frac{E_c - F}{kT}}; \quad p = N_v e^{\frac{F - E_v}{kT}}, \tag{38}$$

$N_c$ și $N_v$ reprezentînd numărul efectiv de stări din zona de conducție, respectiv din cea de valență.



Valorile lui $N_c$ și $N_v$ sînt caracteristice fiecărui semiconductor, în toate cazurile ele depinzînd puternic de temperatură.

## RECOMBINAREA PURTĂTORILOR DE SARCINĂ

Atunci cînd printr-o metodă oarecare (de exemplu, iluminare) în volumul semiconductorului sînt generați purtători de sarcină suplimentari, starea de echilibru termodinamic este încălcată. După cum am văzut, într-o asemenea stare de neechilibru apare efectul fotoelectric intern. Cînd am discutat acest efect am explicat saturarea în timp a conductivității, presupunînd că o parte din purtătorii fotogenerați se recombină între ei, ajungîndu-se la un moment dat la o stare staționară.

Recombinarea purtătorilor în exces poate fi descrisă intuitiv în reprezentarea benzilor energetice, această descriere dîndu-ne posibilitatea să determinăm, prin metode matematice relativ simple, timpul de viață al purtătorilor.

Am arătat că prezența în semiconductor a impurităților donoare și acceptoare conduce la apariția unor stări energetice permise în banda interzisă, nivelele corespunzătoare fiind foarte apropiate de limitele benzilor permise. Astfel de nivele permise pot apare în banda interzisă, mai aproape de mijlocul ei, datorită prezenței altor tipuri de atomi sau din cauza unor imperfecțiuni ale rețelei cristaline. Aceste nivele pot fi donoare, acceptoare sau neutre și, deoarece favorizează recombinarea purtătorilor, atomii străini sau defectele care le produc se mai numesc și *centri de recombinare*.

Recombinarea directă a unui electron din banda de conducție cu un gol din banda de valență se produce cu o probabilitate mai mare în cazul semiconductoarelor ce au o lărgime mică a benzii interzise (0,2—0,3 eV). Atunci cînd banda interzisă are o lărgime mai mare, recombinarea purtătorilor se face cu precădere prin intermediul nivelelor ce apar în interiorul ei. Acesta este și cazul siliciului a cărui bandă interzisă este de 1,11 eV.

Să examinăm cazul simplu al unor centri de recombinare ce introduc în banda interzisă un singur nivel, $E_t$, situat la distanțe aproximativ egale de $E_c$ și $E_v$. Vom presupune că acest nivel este inițial neutru.

Există două tipuri de procese care pot conduce la recombinare prin intermediul nivelului $E_t$:

1. defectul neutru captează un electron din banda de conducție, se încarcă negativ și captează apoi un gol din banda de valență devenind din nou neutru (fig. 35 a, b, c)

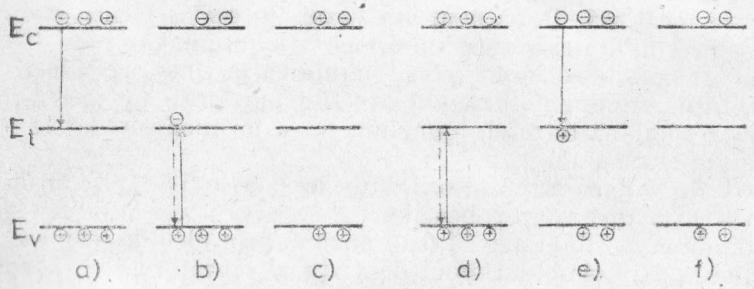



Fig. 35 — Reprezentare schematică a recombinării prin intermediul unui nivel din banda interzisă.

2. defectul neutru captează întîi un gol din banda de valență, se încarcă pozitiv și captează apoi un electron din zona de conducție, revenind la starea inițială neutră (fig. 35 d, e, f).

Captarea golului din banda de valență este echivalentă cu cedarea unui electron acestei benzi energetice, lucru reprezentat în fig. 35 prin săgeți întrerupte.

Dacă notăm cu $R$ viteza de recombinare, adică scăderea în unitatea de timp a concentrației purtătorilor în exces datorită recombinării, putem defini o mărime extrem de importantă — timpul de viață ($\tau$) al purtătorilor excedentari.

În cazul electronilor vom putea scrie:

$$\tau_n = \frac{n - n_0}{R} = \frac{\Delta n}{R}, \tag{39}$$



iar în cazul golurilor:

$$\tau_p = \frac{p - p_0}{R} = \frac{\Delta p}{R}. \tag{40}$$

În relațiile (39) și (40) prin $n_0$ și $p_0$ sînt desemnate concentrațiile electronilor și golurilor la echilibru termodinamic, iar prin $n$ și $p$ — concentrațiile în cazul în care echilibrul termodinamic este încălcat. Se observă că atunci cînd $\Delta n = \Delta p$ cei doi timpi de viață sînt egali

$$\tau_n = \tau_p = \tau \tag{41}$$

$\tau$ fiind timpul de viață al unei perechi electron-gol.

Calculele conduc la concluzia că timpul de viață al unei perechi electron-gol în condiții de neechilibru este maxim în semiconductorul intrinsec. În cazul semiconductoarelor puternic impurificate valoarea lui $\tau$ este determinată numai de timpul de captare al purtătorilor minoritari. De exemplu, în cazul unui semiconductor de tip $N$ captarea unui gol determină captarea imediată a unui electron, numărul electronilor fiind cu mult mai mare decît al golurilor.

Cu cît timpul de viață al purtătorilor este mai mare, cu atît drumul pe care ei îl pot parcurge (fără a se recombina) sub acțiunea unui cîmp electric este mai lung. După cum am văzut, atunci cînd am discutat despre efectul fotoelectric extern, această distanță poartă numele de lungime de drift.

Atunci cînd într-un semiconductor sînt produși purtători de sarcină de neechilibru își face apariția și un alt fenomen — deplasarea electronilor și golurilor spre regiunile unde concentrațiile corespunzătoare sînt mai mici. Acest fenomen se petrece în absența vreunui cîmp electric și poartă numele de *difuzie*. El este caracterizat printr-o mărime $D$, numită *coeficient de difuzie*, care depinde de mobilitatea $\mu$ a purtătorilor de sarcină. Expresia coeficientului de difuzie este dată de relația lui Einstein:

$$D = \frac{kT}{q}\mu, \tag{42}$$

unde $k$ este constanta lui Boltzmann, $T$ — temperatura absolută, iar $q$ — valoarea sarcinii elementare.

Deoarece mobilitățile electronilor și golurilor au valori diferite ($\mu_n > \mu_p$), rezultă că și coeficienții lor de difuzie vor fi diferiți, și anume $D_n > D_p$.

Cantitatea $\sqrt{D\tau}$ are dimensiunea unei lungimi, ca reprezentînd distanța pe care o poate parcurge în medie un purtător liber atunci cînd se mișcă datorită difuziei. După parcurgerea acestei distanțe purtătorul respectiv dispare prin recombinare. Această distanță se notează cu $L$:

$$L = \sqrt{D\tau} \tag{43}$$

și poartă numele de *lungime de difuzie.*

Valoarea mai mare a coeficientului de difuzie al electronilor face ca și lungimea lor de difuzie să fie mai mare ($L_n > L_p$). Cu alte cuvinte, distanța pe care o parcurg în medie electronii prin difuzie pînă cînd se recombină este mai mare decît în cazul golurilor.

Recombinarea dintre electroni și goluri poate fi clasificată după modul în care este cedată energia pe care aceștia o aveau în momentul recombinării. Atunci cînd energia purtătorilor ce se recombină este cedată rețelei cristaline, recombinarea se numește *neradiativă*, iar dacă această energie se emite sub formă de fotoni avem de a face cu o recombinare *radiativă*.

## JONCȚIUNEA P—N

Să presupunem că printr-o metodă oarecare am reușit să realizăm un contact intim între suprafețele perfect plane a două bucăți dintr-un același material semiconductor, ce au conductibilități electrice diferite (de exemplu, siliciu de tip $N$ și de tip $P$). Un astfel de ansamblu poartă numele de *joncțiune* $P$—$N$ (sau $N$—$P$). Cunoașterea fenomenelor ce se petrec într-o astfel de joncțiune este indispensabilă înțelegerii funcționării dispozitivelor electronice semiconductoare.

Vom analiza ce se întîmplă de o parte și de alta a suprafeței de contact utilizînd reprezentarea unidimensională din figura 36, unde s-a presupus că concentrația impurităților



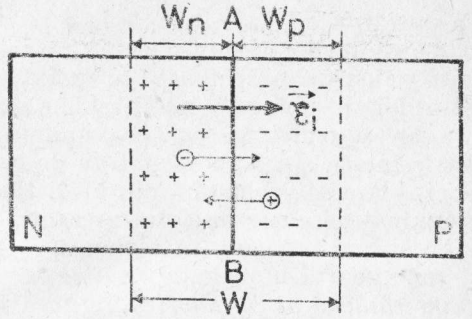



Fig. 36 — Formarea regiunii de sarcină spațială în joncțiunea $P-N$.

donoare din semiconductorul de tip $N$ este egală cu cea a impurităților acceptoare din semiconductorul de tip $P$ ($N_D = N_A$).

Deoarece în semiconductorul de tip $N$ purtătorii majoritari sînt electronii, iar în cel de tip $P$ — golurile, la stînga frontierei $AB$ există electroni liberi iar la dreapta ei — goluri libere. Această situație favorizează difuzia purtătorilor liberi prin frontiera $AB$:

— electronii din semiconductorul de tip $N$ vor ajunge în regiunea de tip $P$ unde se vor recombina cu golurile,

— golurile din semiconductorul de tip $P$ difuzează în regiunea de tip $N$, recombinîndu-se acolo cu electronii liberi.

Bineînțeles că primii purtători ce difuzează sînt cei care se află în imediata vecinătate a frontierei $AB$.

Această difuzie a purtătorilor liberi are ca efect încărcarea electrică a celor două regiuni; regiunea $N$ se încarcă pozitiv, iar regiunea $P$ — negativ, deoarece sarcinile electrice ale ionilor donori și acceptori din apropierea frontierei nu mai sînt compensate de sarcinile purtătorilor liberi, aceștia difuzînd și dispărînd prin recombinare. Încărcarea electrică a celor două regiuni determină apariția unui cîmp electric orientat de la regiunea $N$ spre regiunea $P$. El poartă numele de *cîmp electric intern* al joncțiunii ($\vec{\xi}_i$) și se opune deplasării

prin difuzie a purtătorilor majoritari de la o regiune la alta. Cu cît numărul purtătorilor ce au traversat frontiera este mai mare, cîmpul electric este mai intens și se opune mai puternic difuziei purtătorilor. Se ajunge în acest fel la o stare de echilibru dinamic, care se realizează pentru o anumită valoare a cîmpului electric intern. În aceste condiții, de o parte și de alta a frontierei $AB$ există zone fără purtători liberi de grosimi bine determinate, în care însă sînt prezenți ioni pozitivi (în regiunea $N$) și ioni negativi (în regiunea $P$). Ansamblul acestor două zone poartă numele de *regiune de sarcină spațială* sau *regiune sărăcită de purtători*. Lărgimea $W$ a acestei regiuni va fi:

$$W = W_n + W_p, \tag{44}$$

unde $W_n$ și $W_p$ reprezintă regiunile sărăcite de purtători liberi din semiconductorul de tip $N$, respectiv din cel de tip $P$. Dacă concentrațiile impurităților din cele două regiuni sînt diferite, atunci $W_n \neq W_p$, regiunea de sarcină spațială extinzîndu-se mai mult în regiunea a cărei concentrație de impurități este mai mică.

Existența sarcinii spațiale determină apariția unei *diferențe interne de potențial* ($U_i$) între regiunea $N$ și regiunea $P$. Această diferență internă de potențial, numită și *barieră de potențial*, nu poate fi măsurată (oricît de sensibil ar fi voltmetrul utilizat în acest scop) deoarece ea se datorează unei stări de echilibru.

Lărgimea regiunii de sarcină spațială depinde atît de concentrațiile impurităților din regiunile $N$ și $P$, cît și de diferența internă de potențial:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} U_i \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A}\right)} \tag{45}$$

$\varepsilon$ fiind permitivitatea electrică a materialului semiconductor, iar $q$ — valoarea sarcinii elementare.

O altă mărime ce caracterizează o joncțiune $P$—$N$ este capacitatea ei electrică. Pentru găsirea expresiei acestei capacități vom utiliza o analogie, rezultatul la care vom ajunge fiind însă exact.



Deoarece în regiunea de sarcină spațială nu există purtători liberi, această regiune va fi din punct de vedere electric un izolator (dielectric). Ansamblul din figura 36 poate fi privit ca un condensator plan, el fiind format din două regiuni conductoare separate printr-un dielectric. Cum capacitatea unui condensator plan este direct proporțională cu suprafața uneia din plăcile sale și invers proporțională cu distanța dintre ele, obținem pentru capacitatea joncțiunii $P$—$N$ următoarea relație:

$$C = \frac{\varepsilon S}{W} \tag{46}$$

unde $\varepsilon$ este permitivitatea electrică a semiconductorului, $S$ — suprafața joncțiunii, iar $W$ — lărgimea regiunii de sarcină spațială.

Deoarece, după cum vom vedea, valoarea lui $W$ depinde de modul de polarizare a joncțiunii, valoarea capacității depinde atît de valoarea tensiunii aplicate cît și de sensul ei.

Datorită trecerii bruște de la un tip de conductibilitate la altul de-a lungul frontierei $AB$, joncțiunea $P$—$N$ discutată se numește joncțiune *abruptă*. Ea reprezintă o idealizare a joncțiunilor ce se obțin practic, în acestea trecerea de la un tip de conductibilitate la altul făcîndu-se treptat. Un asemenea tip de joncțiune se numește *joncțiune gradată*. Toate considerațiile calitative făcute pentru joncțiunea abruptă rămîn valabile și în cazul joncțiunii gradate.

Dacă joncțiunea $P$—$N$ se realizează într-un material semiconductor ce prezintă tipuri diferite de conductibilitate spunem că avem de a face cu o *homojoncțiune*. Dacă joncțiunea $P$—$N$ este realizată între două materiale de naturi diferite [de exemplu, ZnSe (tip $N$) și GaAs (tip $P$)] ea poartă numele de *heterojoncțiune*.

## ABSORBȚIA LUMINII ÎN SEMICONDUCTOARE

Așa cum se întîmplă în cazul tuturor corpurilor, o parte din lumina incidentă pe suprafața unui semiconductor este reflectată, iar o altă parte pătrunde în interiorul materialului

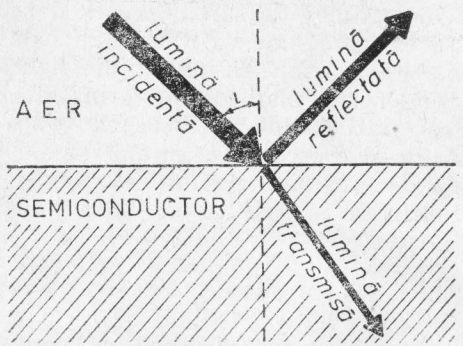



Fig. 37 — Scindarea unui fascicul de lumină la interfața solid-aer.

(este transmisă) (fig. 37). Raportul dintre intensitatea luminii reflectate și cea a luminii transmise depinde de unghiul de incidență $i$. În cele ce urmează vom evita această dependență, considerînd că lumina este perpendiculară pe suprafața semiconductorului (incidență normală).

Dacă notăm cu $J_0$ intensitatea luminii incidente pe suprafața semiconductorului și cu $J_R$ intensitatea luminii reflectate putem defini coeficientul de reflexie R:

$$R = \frac{J_R}{J_0}. \tag{47}$$

După cum se vede, coeficientul de reflexie definește fracțiunea din energia fluxului luminos care se reflectă pe suprafață. Intensitatea luminii imediat după traversarea suprafeței o vom nota cu $J(0)$ și ea se va putea scrie:

$$J(0) = J_0 - J_R = J_0 - RJ_0 = (1 - R)J_0. \tag{48}$$

Experimentele evidențiază dependența coeficientului de reflexie de lungimea de undă a luminii incidente, $R = R(\lambda)$, această dependență numindu-se spectru de reflexie.

Datorită absorbției în materialul semiconductor, intensitatea luminii la o distanță $x$ de suprafață va trebui să depindă de mărimea acestei distanțe, adică $J = J(x)$ (fig. 38). La



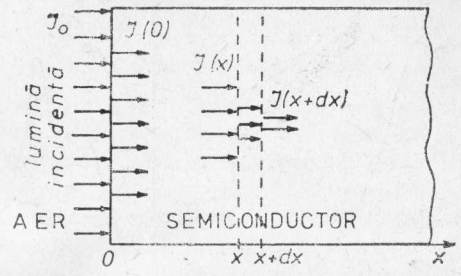



Fig. 38 — Reprezentare schematică a absorbției luminii într-un semiconductor.

distanța $x + dx$ intensitatea luminii va trebui să fie mai mică decît la distanța $x$ și prin urmare:

$$J(x + dx) - J(x) = dJ(x) < 0. \tag{49}$$

Cum pierderea de energie pe distanța $dx$ trebuie să depindă, pe lîngă $dx$, de intensitatea la distanța $x$ și de gradul în care materialul absoarbe lumina, vom putea scrie:

$$-dJ(x) = \alpha J(x)dx \tag{50}$$

unde $\alpha$ descrie absorbția în material și se numește *coeficient de absorbție*.

Ecuația (50) se integrează simplu și, dacă se ține cont de relația (48), se obține:

$$J(x) = (1 - R)J_0 e^{-\alpha x}. \tag{51}$$

Coeficientul de absorbție a luminii depinde de lungimea de undă $\alpha = \alpha(\lambda)$, această dependență purtînd numele de spectru de absorbție. În figura 39 este înfățișat modul în care R și $\alpha$ depind de lungimea de undă a luminii în cazul siliciului.

Absorbția diferită a luminii în funcție de lungimea ei de undă face ca și adîncimea pînă la care poate pătrunde lumina să fie funcție de $\lambda$. Din figura 40 se observă că lumina ultravioletă este absorbită într-un strat foarte subțire din apropierea suprafeței în timp ce pentru lungimi de undă mai mari de 1,1 $\mu$m siliciul este practic transparent.

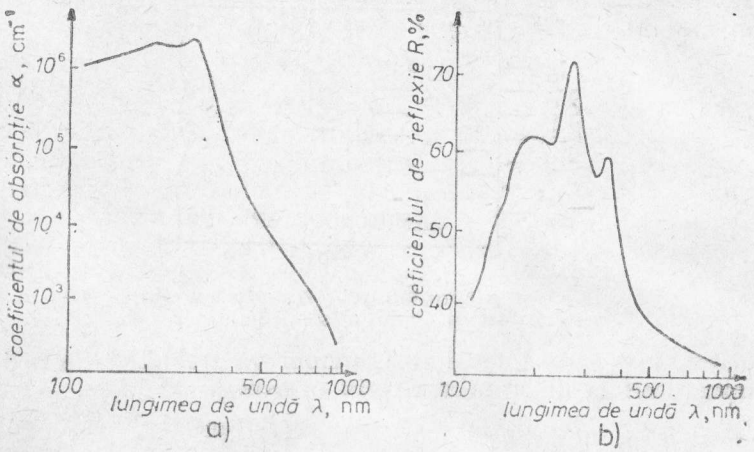



Fig. 39 — a) Spectrul de absorbție al siliciului; b) Spectrul de reflexie al siliciului.

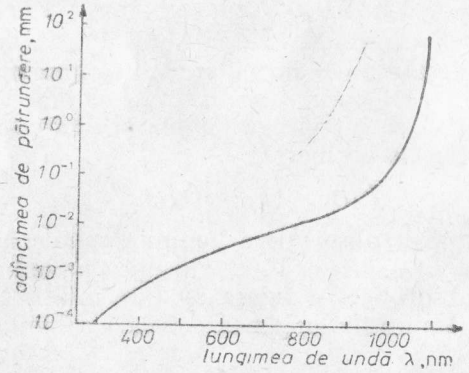



Fig. 40 — Dependența adîncimii de pătrundere a luminii în siliciu de lungimea de undă.

După cum s-a arătat (relația 21), viteza de generare a purtătorilor liberi depinde de coeficientul de absorbție $\alpha$ și de fluxul luminos $\Phi$. Deoarece $\alpha$ depinde de $\lambda$, iar fluxul



luminos se diminuează pe măsură ce distanța de la suprafață crește, relația (21) se poate scrie sub forma:

$$G = G(x, \lambda) = \eta\alpha(\lambda)\,\Phi(x). \qquad (52)$$

Pe baza relației (52) putem afirma că, oricare ar fi lungimea de undă a luminii, viteza de generare este diferită la adîncimi diferite sau, cu alte cuvinte, că în volumul semiconductorului se produce o generare neuniformă a purtătorilor liberi sub acțiunea luminii. Aceasta înseamnă că și concentrațiile de neechilibru ale purtătorilor vor scădea cu adîncimea, ele fiind mai mari lîngă suprafața iluminată a semiconductorului. Am văzut însă că atunci cînd purtătorii liberi au concentrații diferite, ei difuzează din regiunea cu concentrație mare spre regiunea cu concentrație mică. Prin urmare electronii și golurile vor difuza spre partea neiluminată a semiconductorului. Cum însă coeficientul de difuzie al electronilor este mai mare decît cel al golurilor, golurile vor rămîne *mereu* în urma electronilor, ceea ce determină o separare spațială a purtătorilor liberi. Suprafața iluminată se va încărca pozitiv, iar cea neiluminată — negativ, în semiconductorul omogen apărînd un cîmp electric $\vec{\xi}_D$ (fig. 41).

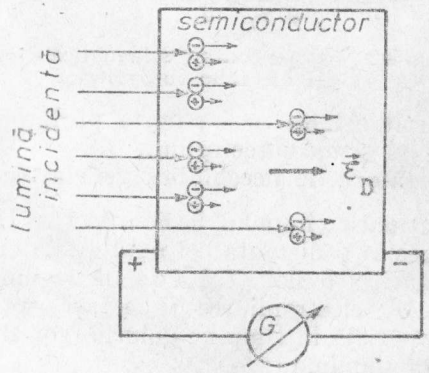



Fig. 41 — Reprezentare schematică a apariției efectului Dember.

Acest fenomen poartă numele de *efect Dember*. După cum se vede, el se produce în condiții de neechilibru, iar un voltmetru conectat la suprafața iluminată și la cea opusă ei va indica o anumită tensiune, a cărei valoare este mică. Sensul cîmpului Dember $\vec{\xi}_D$, deci și al tensiunii apărute, este independent de felul impurităților prezente în materialul semiconductor, singura condiție fiind aceea de a fi distribuite uniform, astfel încît semiconductorul să fie omogen.

Un efect similar, însă mult mai pronunțat, apare atunci cînd se iluminează o joncțiune $P$—$N$. Este vorba de efectul *fotovoltaic*. În acest caz, rolul esențial în separarea purtătorilor liberi îl are cîmpul electric intern $\vec{\xi}_i$ al joncțiunii.

Mecanismul de apariție al efectului fotovoltaic este prezentat schematic în figura 42. Cîmpul electric intern $\vec{\xi}_i$, nu

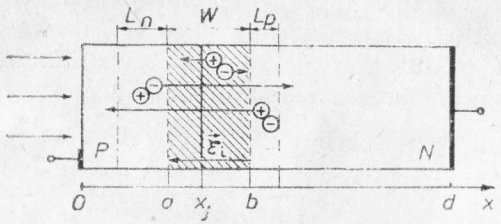



Fig. 42 — Reprezentare schematică a apariției efectului fotovoltaic.

acționează decît asupra unei părți a purtătorilor fotogenerați în volumul semiconductorului:

— dintre purtătorii de neechilibru generați în zona $P$ vor suferi acțiunea cîmpului $\vec{\xi}_i$ doar cei a căror generare se produce la o distanță cel mult egală cu lungimea de difuzie a electronilor ($L_n$) față de regiunea de sarcină spațială $W$; electronii vor fi „atrași" spre regiunea de sarcină spațială în timp ce golurile vor fi respinse spre suprafața iluminată;

— cîmpul electric intern va orienta mișcarea tuturor purtătorilor fotogenerați în regiunea de sarcină spațială — electronii vor fi obligați să se miște în sens invers lui $\vec{\xi}_i$, ajungînd în regiunea $N$, iar golurile se vor deplasa în sensul lui $\vec{\xi}_i$ spre regiunea $P$;

— dintre purtătorii fotogenerați în zona $N$, doar cei ce apar la o distanță cel mult egală cu lungimea de difuzie a golurilor ($L_p$) față de regiunea de sarcină spațială vor putea intra sub influența lui $\vec{\xi}_i$, golurile fiind „atrase" spre regiunea de sarcină spațială, iar electronii — „respinși" spre extremitatea neiluminată.

Prin urmare, cîmpul intern al joncțiunii favorizează trecerea spre regiunea de sarcină spațială a purtătorilor minoritari de neechilibru ce apar în regiunea $P$ și în regiunea $N$. Ca urmare a acestui transport de sarcini, regiunea $N$ se încarcă negativ, iar regiunea $P$ — pozitiv. Un voltmetru conectat între regiunile cu conductibilități diferite va indica prezența unei tensiuni (de ordinul sutelor de milivolți) care poartă numele de *tensiune de circuit deschis* ($V_{OC}$). Dacă între cele două regiuni se conectează un rezistor, prin el va circula un curent electric.

Efectul fotovoltaic stă la baza funcționării unei largi game de dispozitive optoelectronice semiconductoare.

## TEHNOLOGII DE REALIZARE A JONCȚIUNILOR SEMICONDUCTOARE

Punerea în contact intim a două regiuni cu conductibilități electrice de tipuri diferite nu se face prin lipirea lor una de alta (așa cum ar putea sugera începutul prezentării proceselor ce au loc în joncțiunea $P$—$N$), ci prin tehnici speciale.

### ALIEREA

Cel mai simplu mod de a realiza o joncțiune $P$—$N$ este *alierea* dintre un semiconductor de tip $N$ și un metal care pentru semiconductorul respectiv reprezintă o impuritate acceptoare. În cazul în care semiconductorul utilizat este de tip $P$, metalul cu care se face alierea va trebui să fie impuritate donoare.

În figura 43 se prezintă schematic realizarea prin aliere cu indiu a unei joncțiuni $P$—$N$ în germaniu. Procedeul este relativ simplu: o granulă de indiu se așază pe un substrat de germaniu de tip $N$, se introduce cîteva minute într-un

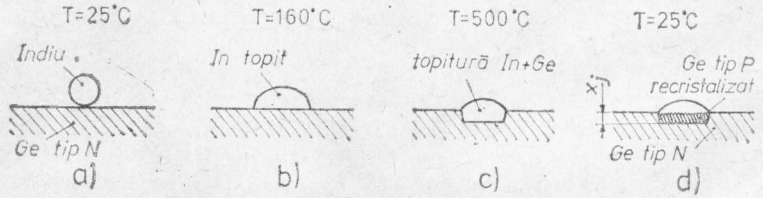



Fig. 43 — Realizarea prin aliere a unei joncțiuni $P$—$N$.



cuptor la o temperatură mai mare decît cea de topire a indiului și se lasă apoi să se răcească la temperatura camerei. În timpul încălzirii, sub granula de indiu se formează o soluție de In-Ge, atomii de indiu ajungînd astfel la o anumită adîncime sub suprafața semiconductorului. În timpul răcirii atît indiul, cît și germaniul impurificat recristalizează. Deoarece în germaniu rămîn atomi de indiu (acceptori), se formează o joncțiune $P$—$N$.

Un mare inconvenient al acestei metode este acela că distribuția impurităților nu poate fi controlată suficient de precis. Datorită acestui fapt dispersia parametrilor electrici ai dispozitivelor obținute prin aliere este mare, performanțele lor fiind prin urmare modeste.

### DIFUZIA IMPURITĂȚILOR

Realizarea joncțiunilor $P$—$N$ prin *difuzie de impurități* se bazează pe posibilitatea de deplasare a atomilor unei substanțe printre atomii unui corp solid datorită unei diferențe de concentrație.

De exemplu, dacă la suprafața unui semiconductor există o impuritate a cărei concentrație este $C_1$, iar în interiorul semiconductorului există aceeași impuritate, distribuită uniform cu concentrația $C_2$ ($C_2 < C_1$), atomii de impuritate din exterior vor migra spre interiorul semiconductorului datorită diferenței de concentrație. Viteza de difuzie într-un anumit material depinde de tipul impurității, de diferența de concentrații și de temperatură, ea crescînd foarte mult odată cu mărirea temperaturii.

Cînd se urmărește formarea prin difuzie a unei joncțiuni $P$—$N$, se pornește de la un semiconductor dopat uniform cu o anumită impuritate (de exemplu, siliciu $N$, impurificat cu arsen) și se difuzează o impuritate de „tip opus" (de exemplu, bor). Joncțiunea se formează la adîncimea la care concentrația acceptorilor difuzați este egală cu cea a donorilor prezenți inițial în materialul semiconductor.

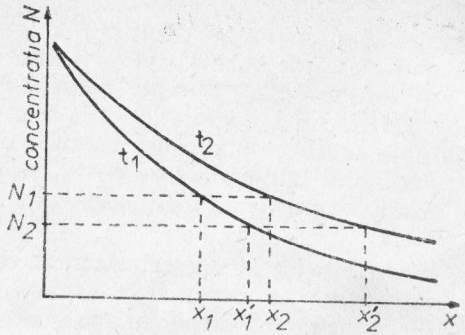


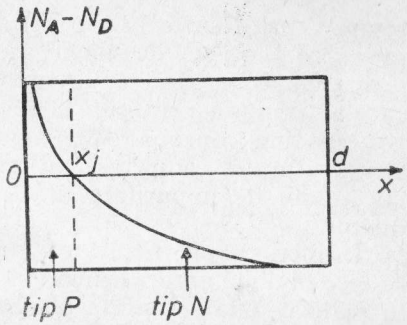

Fig. 44 — Distribuția impurităților în semiconductor ca urmare a difuziei.

În figura 44 este reprezentată calitativ dependența concentrației impurității difuzate de distanța față de suprafața prin care pătrund impuritățile, pentru două valori diferite ale timpului cît durează difuzia. În aceeași figură, prin linie întreruptă orizontală este reprezentată concentrația constantă a impurităților în semiconductorul în care are loc difuzia. Abscisa $x_j$ a punctului de intersecție dintre linia curbă și cea dreaptă reprezintă adîncimea joncțiunii în materialul semiconductor. Se observă că atunci cînd concentrația inițială a impurităților din semiconductor are o valoare mai mare, adică rezistivitatea lui este mai mică, joncțiunea este mai apropiată de suprafață ($x_1 < x_1'$). Din figura 44 remarcăm că, oricare ar fi concentrația impurităților la suprafața exterioară, mărirea timpului de difuzie determină formarea joncțiunii la o adîncime mai mare ($x_2 > x_1$; $x_2' > x_2'$).

O altă imagine calitativă a realizării unei joncțiuni $P$—$N$ prin difuzie este dată în figura 45, presupunînd că sînt difuzați acceptori într-un semiconductor de tip $N$. Pe ordonată s-a reprezentat diferența dintre concentrația acceptorilor difuzați și cea a donorilor existenți inițial în semiconductor. Se observă că la stînga lui $x_j$ concentrația acceptorilor o depășește pe cea a donorilor, semiconductorul fiind deci în această regiune de tip $P$. La dreapta lui $x_j$ întîlnim situația inversă — acceptorii ajunși la asemenea distanțe au o con-



Fig. 45. — Dependența de distanța la suprafața semiconductorului a concentrației nete de impurități în urma difuziei acceptorilor într-un semiconductor ce conține impurități donoare.




centrație inferioară donorilor, această regiune păstrîndu-și deci tipul de conductivitate avut inițial.

Timpii relativ mari (de ordinul zecilor de minute) necesari impurităților pentru a difuza într-un material semiconductor în scopul formării joncțiunilor la adîncimi de ordinul micrometrilor permit un control foarte bun asupra lui $x_j$. Precizia cu care se poate obține prin difuzie o anumită adîncime a joncțiunii este de ordinul zecimilor de micrometru.

Difuzia impurităților se realizează în cuptoare speciale. Configurația unui cuptor de difuzie este prezentată în figura 46. Un flux de gaz inert (Ar, He) traversează două zone cu

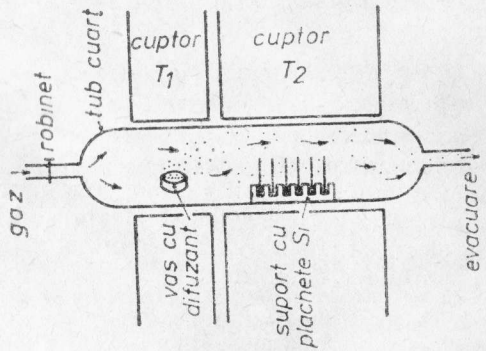



Fig. 46 — Prezentare schematică a unui cuptor de difuzie.

temperaturi diferite ($T_1 < T_2$) antrenînd atomii de impuritate spre *plachetele* de siliciu[1] așezate în poziție verticală. În prima zonă se găsește un creuzet ce conține impuritatea care se evaporă continuu la temperatura $T_1$. Acești vapori trec în flux continuu spre suprafața plachetelor aflate la temperatura $T_2$ (cuprinsă de regulă între 1 100 și 1 200°C), iar atomii de impuritate difuzează în materialul semiconductor.

În mod curent, realizarea joncțiunilor $P$—$N$ prin difuzie se face în două etape. Prima etapă, numită *predifuzie*, constă în realizarea la suprafața plachetei a unui strat cu concentrație mare de impurități; acesta nu poate pătrunde la o adîncime prea mare datorită timpului scurt cît durează procesul. Predifuzia se face într-un cuptor de tipul celui din figura 46.

În etapa a doua, impuritățile sînt făcute să pătrundă mai adînc în materialul semiconductor prin încălzire într-un gaz inert ce nu conține nici un fel de impurități. În acest proces, difuzia impurităților poate să se producă și în sens invers — din semiconductor spre gazul inert purificat care le înconjoară. Se poate evita acest fenomen dacă difuzia se face într-un mediu oxidant capabil să creeze un strat de bioxid de siliciu suficient de gros, ce acționează ca ecran pentru difuzia din siliciu a atomilor de impuritate.

## CONTACTE OHMICE

Cel mai simplu dispozitiv electronic semiconductor activ — dioda — este constituită dintr-o singură joncțiune $P$—$N$. Însă pentru a fi un dispozitiv, unei joncțiuni semiconductoare trebuie să i se aplice două straturi metalice pentru contactare electrică, fiabilitatea ansamblului fiind asigurată printr-o încapsulare adecvată.

[1] În tehnologia dispozitivelor electronice semiconductoare siliciul este utilizat sub forma unor discuri al căror diametru este de 2 — 10 cm, iar grosimea de aproximativ 0,1 — 0,7 mm. Aceste discuri sînt denumite plachete. Ele provin din tăierea unor lingouri cilindrice obținute în procesul de fabricație a siliciului.



Contactele metalice pe zona $P$ și zona $N$ trebuie să fie *ohmice*, adică rezistența lor electrică să nu depindă de sensul tensiunii electrice aplicate. Realizarea contactelor ohmice pe semiconductoare este o problemă importantă, de rezolvarea căreia depinde în mod esențial utilizarea optimă a dispozitivului. Deoarece în foarte multe cazuri astfel de contacte se realizează cu aluminiu, vom descrie sumar modul de realizare a contactelor ohmice Al-Si.

Dacă contactarea cu aluminiu trebuie făcută pe siliciu de tip $N$, în zona contactului se efectuează o impurificare suplimentară cu donori, creîndu-se un strat puternic dopat (deci cu conductibilitate electrică foarte mare) în apropierea suprafeței. Se depune apoi în vid un strat de aluminiu și se încălzește un anumit timp la o temperatură de aproximativ 550°C. La această temperatură, la interfața Al-Si se produce o întrepătrundere pe o distanță foarte mică a atomilor celor două substanțe, realizîndu-se în acest fel contactul ohmic.

În cazul în care contactarea trebuie făcută pe siliciu de tip $P$ procedeul este asemănător, cu singura deosebire că impurificarea suplimentară se realizează cu atomi acceptori.

## TEHNOLOGIA PLANARĂ

Combinarea avantajelor difuziei cu cele ale „mascării" cu oxid a condus la apariția *tehnologiei planare*, prin intermediul căreia se pot obține dispozitive electronice semiconductoare cu performanțe superioare, de la diode pînă la circuite integrate pretențioase.

În figura 47 este prezentat schematic procedeul de obținere a diodelor semiconductoare prin tehnologia planară. După cum am menționat, stratul de bioxid de siliciu crescut pe plachetă are rolul de a împiedica ieșirea unor impurități din siliciu în timpul procesului de difuzie. El mai are însă și alte două proprietăți esențiale: asigură izolarea (pasivarea) joncțiunii față de mediul ambiant și, dacă grosimea lui este

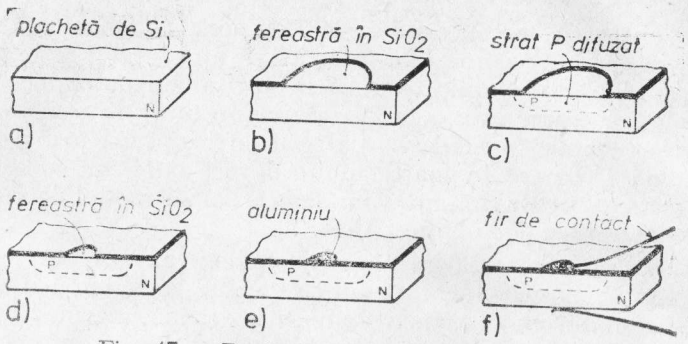



Fig. 47 — Realizarea diodelor semiconductoare prin tehnologie planară.

convenabil aleasă, permite realizarea unor difuzii multiple succesive (vom reveni asupra acestui aspect cînd vom discuta tranzistorul).

Spre deosebire de aliere, unde fiecare joncțiune se obține individual, tehnologia planară dă posibilitatea realizării simultane a unui număr extrem de mare de joncțiuni (sute sau mii) pe o plachetă de siliciu.

După ce placheta a fost oxidată termic pe întreaga suprafață, oxidul este înlăturat prin corodare chimică din locurile unde urmează să aibă loc difuzia impurităților. Pentru marcarea acestor locuri se utilizează o tehnică fotografică — *fotogravura* (fig. 48). Suprafața oxidului este acoperită uniform cu o anumită substanță (fotorezist) sensibilă la acțiunea luminii. Deasupra plachetei se așază o placă de sticlă pe care sînt indicate (de exemplu, prin zone transparente) locurile unde urmează să se producă corodarea. Un fascicul de lumină este trimis perpendicular pe suprafața plăcii de sticlă un anumit timp, după care placheta se încălzește. Acolo unde a pătruns lumina fotorezistul nu polimerizează și agenții de corodare pot acționa asupra lui. Corodarea se va produce deci selectiv, permițînd astfel deschiderea „ferestrelor" pentru difuzie.



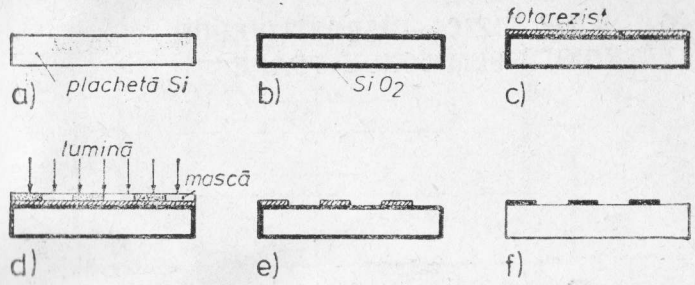



Fig. 48 — Tehnica fotogravurii: a) plachetă de siliciu ce urmează a fi difuzată; b) oxidare termică; c) depunerea fotorezistului; d) iluminarea prin mască de sticlă; e) înlăturarea fotorezistului din zonele iluminate; f) corodarea chimică a bioxidului de siliciu din zonele fără fotorezist, urmată de înlăturarea fotorezistului.

După difuzie se depun stratele metalice pentru contactare și apoi structurile de diode sînt separate una de alta prin tăiere.

## NOȚIUNI DE FIZICA DISPOZITIVELOR ELECTRONICE SEMICONDUCTOARE

### DIODA SEMICONDUCTOARE

În capitolul anterior am făcut afirmația că joncțiunile $P$—$N$ sînt diode semiconductoare. După cum știm, numele de diodă a fost atribuit pentru prima dată tubului vidat cu doi electrozi (anod și catod) care permite trecerea curentului numai atunci cînd tensiunea aplicată are un sens bine determinat (polul pozitiv conectat la anod, iar cel negativ — la catod). Pentru a înțelege modul în care o joncțiune $P$—$N$ se comportă în acest fel, să analizăm fenomenele ce se petrec atunci cînd tensiunea aplicată își schimbă polaritatea.

Dacă regiunea de tip $N$ a joncțiunii este polarizată pozitiv, iar cea de tip $P$ — negativ, spunem că dispozitivul este polarizat invers. Cînd polaritatea se schimbă (polul pozitiv pe regiunea $P$, iar cel negativ pe regiunea $N$) se spune că dioda funcționează în polarizare directă.

În toate considerațiile pe care le vom face relativ la fenomenele din dispozitivele electronice semiconductoare în acest capitol, vom presupune că structurile semiconductoare se află la întuneric.

#### *Polarizarea inversă*

În această situație, cîmpul electric datorat tensiunii externe aplicate este de același sens cu cîmpul electric intern al joncțiunii, ceea ce conduce la o extindere a regiunii de sarcină spațială atît în regiunea $N$, cît și în regiunea $P$



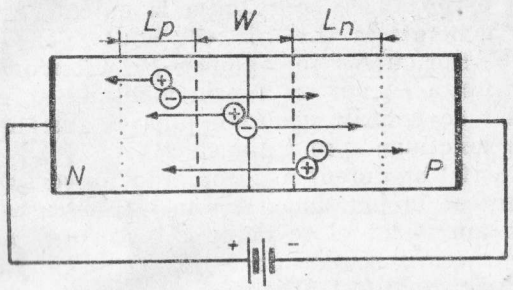



Fig. 49 — Joncțiune $P$—$N$ polarizată invers.

(fig. 49). Lărgirea regiunii lipsite de purtători liberi va conduce la o mai bună izolare electrică a regiunilor $N$ și $P$ deoarece, după cum am văzut, această regiune se comportă ca un dielectric. În aceste condiții, un galvanometru montat în circuitul exterior va indica prezența vreunui curent? La prima vedere, un astfel de curent nu ar trebui să existe, cel puțin la tensiuni de ordinul voltilor. Și totuși galvanometrul indică un curent a cărui valoare este, ce-i drept, foarte mică. Să explicăm apariția lui.

Am arătat că în semiconductoarele aflate la echilibru are loc o continuă generare termică de electroni și goluri, numărul de purtători liberi neputînd depăși anumite valori datorită existenței fenomenului de recombinare. Acest fenomen se petrece în tot volumul semiconductorului și prin urmare el va avea loc atît în regiunile $N$ și $P$, cît și în regiunea de sarcină spațială a joncțiunii.

Aplicarea unei tensiuni inverse va separa electronii și golurile generate termic, și va micșora astfel probabilitatea ca ei să se recombine. Toți purtătorii generați termic în regiunea de sarcină spațială sînt orientați în cîmpul electric, electronii fiind dirijați spre regiunea $N$, iar golurile spre regiunea $P$.

Lucrurile se petrec puțin altfel în regiunile neutre ($N$ și $P$); aici doar purtătorii generați termic în regiuni apropiate de zona de sarcină spațială pot fi orientați de cîmpul electric,

putîndu-și astfel aduce contribuția la curent. Aceștia sînt purtătorii generați la distanțe cel mult egale cu $L_p$ (în regiunea $N$) sau cu $L_n$ (în regiunea $P$). Electronii generați pînă la distanța $L_n$ vor trece prin joncțiune spre regiunea $N$, în timp ce golurile generate pînă la distanța $L_p$ vor trece prin joncțiune spre regiunea $P$.

Apare astfel un curent mic, îndreptat în sensul cîmpului electric prezent în joncțiune. Acesta este *curentul invers* și după cum am văzut el se datorează *generării termice* în volumul structurii semiconductoare. Datorită valorii sale foarte mici el a mai fost numit *curent rezidual* sau *curent de scurgere*.

Deoarece viteza de generare depinde de temperatură, iar numărul de purtători generați este proporțional cu volumul în care are loc generarea, curentul invers al diodei va trebui să aibă același tip de dependențe.

În cazul diodelor cu siliciu curenții inverși sînt de ordinul nanoamperilor.

La valori mari ale tensiunii inverse, care pot atinge uneori sute de volți, se observă o creștere bruscă a valorii curentului invers, fenomen denumit *străpungere*. Acest tip de străpungere se datorează unei multiplicări în avalanșă a numărului purtătorilor liberi. Datorită energiei pe care purtătorii generați termic o acumulează în cîmpul electric intens ce apare la tensiuni mari, ei produc o ionizare în avalanșă a atomilor, ceea ce mărește considerabil numărul purtătorilor care participă la conducție.

*Polarizarea directă*

Cîmpul electric aplicat din exterior în acest caz este de sens contrar cîmpului electric intern al joncțiunii. Ca urmare regiunea de sarcină spațială se va îngusta, cîmpul electric rezultant avînd sensul cîmpului intern (fig. 50).

Prin contactul regiunii $N$ pătrund în ea electroni de la sursă, în timp ce prin contactul zonei $P$ pleacă electroni spre sursă. Aceasta face ca numărul purtătorilor majoritari



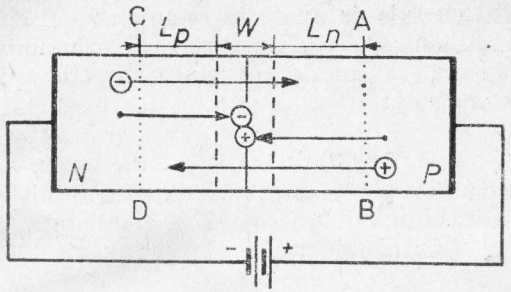



Fig. 50 — Joncțiune $P-N$ polarizată direct.

din aceste două regiuni să se mărească, depășind valorile corespunzătoare echilibrului.

Purtătorii majoritari în exces (electronii din regiunea $N$ și golurile din regiunea $P$) vor difuza datorită diferenței de concentrație față de regiunile adiacente. Electronii excedentari din regiunea $N$ vor difuza spre regiunea $P$, iar golurile excedentare din regiunea $P$ vor difuza spre regiunea $N$. Apare astfel o injecție de purtători în cele două regiuni, electronii și golurile care-i dau naștere mișcîndu-se împotriva cîmpului electric prezent în regiunea de sarcină spațială.

O parte din electronii și golurile ce difuzează se vor recombina în regiunea de sarcină spațială. Electronii care reușesc să treacă prin stratul sărăcit se recombină cu golurile majoritare din regiunea $P$ imediat ce traversează frontiera $AB$ (fig. 50), ei neputînd ajunge la o distanță mai mare ca $L_n$ față de regiunea de sarcină spațială. Similar, golurile ce reușesc să treacă de frontiera $CD$ se recombină cu electronii majoritari din regiunea $N$, mișcarea lor neputîndu-se face pe o distanță mai mare ca $L_p$ în interiorul acestei regiuni.

Fiecare pereche ce se recombină în volumul dispozitivului este echivalentă cu mișcarea unei sarcini elementare prin circuitul exterior. Prin urmare, cu cît numărul de electroni și goluri ce se recombină în unitatea de timp este mai mare, cu atît va fi mai intens curentul electric din circuit.

Curentul electric ce apare în circuit atunci cînd o diodă este polarizată direct se datorează deci recombinării purtătorilor, dependența lui de tensiunea directă aplicată ($V_F$) fiind exponențială:

$$I_{\text{direct}} = I_F \sim e^{qV_F/mkT} \qquad (53)$$

În relația (53) $q$ reprezintă valoarea sarcinii elementare, $k$ — constanta lui Boltzmann, $T$ — temperatura absolută, iar $m$ — un factor numeric a cărui valoare este cuprinsă între 1 și 2.

O caracteristică tipică curent-tensiune pentru o diodă cu siliciu este prezentată în figura 51. Deoarece în cazul joncțiunii polarizate direct, curentul prin circuit este mare,

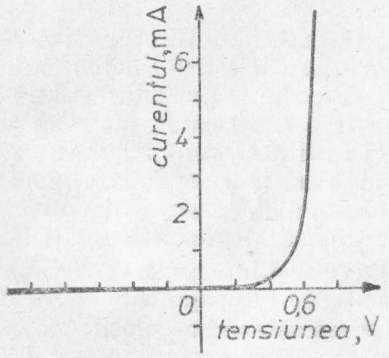



Fig. 51 — Caracteristica curent-tensiune a unei diode cu siliciu.

iar atunci cînd este polarizată invers curentul are o valoare foarte mică, joncțiunea semiconductoare se comportă ca o diodă, justificîndu-și astfel denumirea de diodă semiconductoare.

## TRANZISTORUL CU JONCȚIUNI

Acest dispozitiv electronic semiconductor prezintă două joncțiuni care, în tehnologia planară, se realizează prin difuzie. Dacă se pornește de la o plachetă de siliciu de tip $N$,



prima difuzie se face cu acceptori (de exemplu, bor), iar a doua cu donori (de exemplu, fosfor), concentrația la suprafață a fosforului trebuind să fie mai mare decît a borului (fig. 52). Se realizează astfel o structură semiconductoare $NPN$ care, după metalizare și încapsulare, reprezintă ceea ce numim *tranzistor cu joncțiuni*.

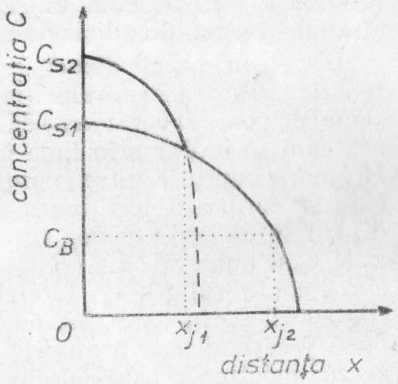



Fig. 52. — Dublă difuzie pentru realizarea tranzistoarelor.

Plecînd de la plachete de tip $P$ se pot obține, prin difuzii corespunzătoare, tranzistoare $PNP$.

Structura tipică a unui tranzistor obținut prin dublă difuzie este prezentată în figura 53. Prima difuzie se face,

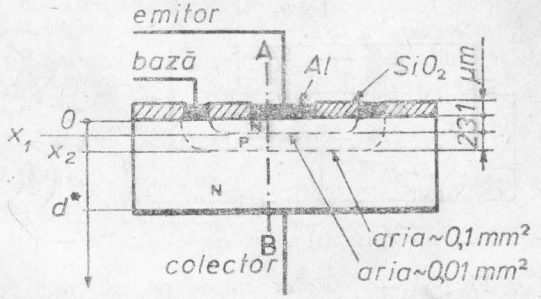



Fig 53 — Structură tipică de tranzistor cu joncțiuni.

ca și în cazul diodei semiconductoare, printr-o fereastră de bioxid de siliciu. Pentru realizarea celei de-a doua difuzii, fereastra inițială este micșorată prin creșterea pe suprafața ei a unui nou strat de bioxid de siliciu, grosimea acestuia fiind astfel aleasă încît impuritățile să nu reușească să-l traverseze prin difuzie. Realizarea contactării metalice pe joncțiunea aflată la adîncime mai mare impune corodarea ulterioară, într-o anumită porțiune, a celui de-al doilea strat de bioxid de siliciu.

Ca și în cazul diodei semiconductoare, vom analiza funcționarea tranzistorului pe baza unui model unidimensional ce poate fi considerat ca o secțiune făcută în structură, așa cum se indică prin linia întreruptă $A$—$B$ în figura 53. Regiunea cuprinsă între suprafața plachetei și adîncimea la care se formează joncțiunea ca urmare a celei de-a doua difuzii se numește *emitor* ($E$, $e$), porțiunea cuprinsă între $x_1$ și $x_2$ se numește *bază* ($B$, $b$), iar zona dintre $x_2$ și $d^*$ reprezintă colectorul ($C$, $c$). Literele din paranteze desemnează simbolurile prin care sînt notate regiunile respective. Cele două joncțiuni poartă numele regiunilor între care se realizează: joncțiunea bază-colector este cea care se află la adîncimea $x_2$, iar cealaltă se numește joncțiune emitor-bază. Tranzistorul își poate realiza funcțiile numai în cazul în care polarizarea joncțiunii emitor-bază este directă, iar cea a joncțiunii bază-colector — inversă (fig. 54 a). În mod

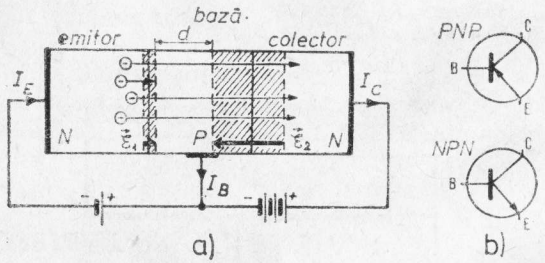



Fig. 54 — a) Reprezentare pentru înțelegerea funcționării tranzistorului; b) Simboluri pentru tranzistoarele cu joncțiuni.



corespunzător, lărgimea zonei de sarcină spațială a joncțiunii emitor-bază se va reduce, iar cea a joncțiunii bază-colector va crește.

Polarizarea directă a joncțiunii emitor-bază conduce la injectarea în bază a unui număr mare de electroni. Dacă distanța $d$ dintre cele două regiuni de sarcină spațială este mai mică decît lungimea de difuzie a electronilor, aceștia se vor recombina doar parțial, majoritatea fiind preluați de cîmpul electric $\vec{\xi}_2$ din joncțiunea bază-colector și transportați în regiunea $N$ a colectorului. Situația este analoagă unei generări preferențiale a electronilor în regiunea colectorului și, deoarece joncțiunea bază-colector este polarizată invers, acești electroni sînt dirijați prin contact în circuitul exterior. Deoarece curentul din joncțiunea emitor-bază, datorat unei polarizări directe, este mare, iar recombinarea purtătorilor în bază este foarte redusă, curentul din circuitul colectorului ($I_C$) va avea valoarea apropiată de cea din circuitul emitorului ($I_E$). Diferența dintre valorile acestor doi curenți reprezintă curentul care circulă prin contactul bazei ($I_B$), datorat purtătorilor ce se recombină în bază:

$$I_B = I_E - I_C. \tag{54}$$

Un tranzistor conectat ca în figura 54 a se spune că este în montaj cu *baza comună*, aceasta însemnînd că baza este legată atît la circuitul de intrare, cît și la cel de ieșire.

Cel mai utilizat mod de conectare a unui tranzistor este în montajul cu *emitor comun* (fig. 55 b), elementul comun intrării și ieșirii fiind în acest caz emitorul.

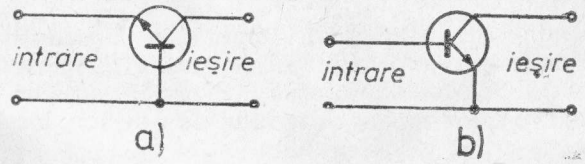



Fig. 55 — Montarea în circuit a tranzistoarelor: a) montaj cu baza comună; b) montaj cu emitorul comun.

Un parametru important al oricărui tranzistor este *factorul de amplificare* în curent continuu, fără aplicarea vreunui semnal alternativ.

Pentru montajul cu baza comună, factorul de amplificare în curent continuu ($\alpha$) este definit de raportul dintre curentul de colector și cel de emitor:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \tag{55}$$

Deoarece $I_C \approx I_E$, rezultă că în cazul unui tranzistor bun $\alpha$ trebuie să aibă valoarea apropiată de unu.

În montajul cu emitor comun, factorul de amplificare în curent continuu ($\beta$) se definește ca raport între curentul de colector și cel de bază:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}. \tag{56}$$

Avînd în vedere că relația (54) este valabilă oricare ar fi modul de conectare al tranzistorului în circuit, pe baza relațiilor (55) și (56) se obține:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \tag{57}$$

Cum $\alpha \approx 1$, valoarea lui $\beta$ va fi mult mai mare decît unu.

Din cele prezentate pînă acum, rezultă că tranzistorul permite obținerea unor variații mari ale curentului din circuitul colectorului pe seama unor variații mici ale lui $I_B$ sau, după cum se mai spune, comandarea curentului de colector prin intermediul curentului de bază.

O familie de caracteristici curent de colector-tensiune colector-emitor pentru montajul cu emitor comun este dată în figura 56. Se observă valorile mici ale curentului de bază în comparație cu cele ale curentului de colector, factorul de amplificare avînd valoarea 300.

Pentru un tranzistor se definesc, analog cazului diodei semiconductoare, doi curenți reziduali și două tensiuni de străpungere.



Curenții reziduali $I_{CEO}$ și $I_{EBO}$ corespund unei anumite valori a tensiunii inverse aplicată separat joncțiunii bază-colector (cu emitorul în gol) și respectiv joncțiunii emitor-bază (cu colectorul în gol). Pentru funcționarea tranzistorului importanța cea mai mare o are $I_{CBO}$ a cărui valoare trebuie să fie cît mai mică.

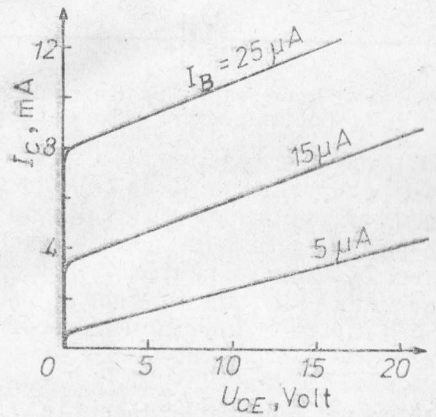



Fig. 56 — Familie de caracteristici pentru un tranzistor aflat în montaj cu emitorul comun.

Cele două tensiuni de străpungere corespund producerii avalanșei în cele două joncțiuni. Ele se notează cu $U_{CBO}$ pentru joncțiunea bază-colector (emitorul fiind în gol) și cu $U_{EBO}$ pentru joncțiunea emitor-bază (colectorul fiind în gol).

În cazul tranzistorului, se poate defini și o a treia tensiune de străpungere ($U_{CEO}$) care nu poate fi însă interpretată în sensul celor cunoscute de la dioda semiconductoare. Pentru a înțelege semnificația lui $U_{CEO}$ să analizăm modul în care se produce această străpungere. Dacă contactul de bază este întrerupt și între emitor și colector se aplică o anumită tensiune (cu polul pozitiv la colector în cazul unui tranzistor

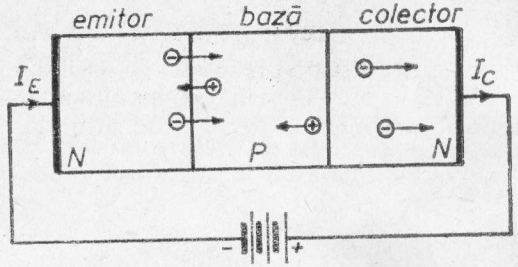



Fig. 57 — Reprezentare pentru explicarea tensiunii de străpungere colector-emitor.

*NPN*) (fig. 57), regiunea bazei va avea un potențial electric variabil. Acest potențial scade de la colector spre emitor și va determina apariția unei polarizări directe slabe a joncțiunii emitor-bază. Ca urmare, în această joncțiune va apare un curent direct $I_O$. Curentul ce trece prin circuit va fi reprezentat deci de suma dintre acest curent ($I_O$) și cel corespunzător polarizării inverse a joncțiunii bază-colector, adică:

$$I_{CEO} = I_O + I_{CBO}. \tag{58}$$

Pe măsură ce tensiunea aplicată crește, se mărește atît valoarea lui $I_O$ cît și a lui $I_{CBO}$, iar procesul de multiplicare în avalanșă se va produce la o tensiune ($U_{CEO}$) inferioară tensiunii de străpungere a joncțiunii bază-colector ($U_{CBO}$).

# DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE SEMICONDUCTOARE ACTIVE BAZATE PE ABSORBȚIA LUMINII

Dispozitivele optoelectronice active sînt dispozitivele electronice cu cel puțin o joncțiune *P*—*N*, în funcționarea cărora un rol important îl joacă lumina. Unele dintre ele (fotosensibile) transformă un semnal luminos într-unul electric, iar altele (cele emisive) au proprietatea de a emite lumină atunci cînd tensiunea directă aplicată la bornele lor are o anumită valoare.

Capitolul de față se ocupă numai de dispozitivele din prima categorie.

În cazul dispozitivelor a căror funcționare se bazează pe interacțiunea cu un fascicul de lumină, este esențială existența unei suprafețe libere a joncțiunii *P*—*N*, neacoperită cu stratul metalic ce asigură contactarea electrică. Corespunzător acestei necesități, încapsularea trebuie făcută adecvat, în sensul existenței în capsulă a unei zone transparente în domeniul lungimilor de undă ce prezintă interes.

Pentru pătrunderea în materialul semiconductor a unei fracțiuni cît mai mari din lumina incidentă, pe suprafața structurilor dispozitivelor de acest tip se depun straturi dielectrice ce micșorează coeficientul de reflexie. Ele poartă numele de straturi antireflectante.

Funcționarea acestor dispozitive optoelectronice se bazează pe efectul fotovoltaic și pe efectul fotoelectric intern, utilizarea unora dintre ele nefiind condiționată de polarizarea electrică exterioară.

## CELULA FOTOVOLTAICĂ

Acest tip de dispozitiv optoelectronic prezintă o joncțiune $P—N$ (fig. 58), funcționarea lui făcîndu-se pe baza efectului fotovoltaic. Aria suprafeței frontale neacoperită de contactul metalic (aria activă) poate varia între cîțiva milimetri pătrați și cîțiva centimetri pătrați.

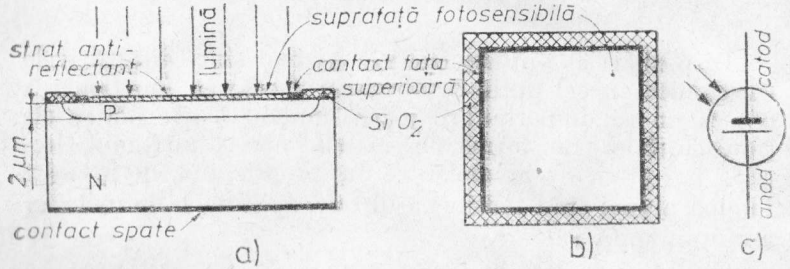



Fig. 58 — a) Structura unei celule fotovoltaice; b) Vedere de sus a structurii; c) Simbolul celulei fotovoltaice în schemele electronice.

Dacă suprafața activă este iluminată, la bornele celulei fotovoltaice apare o tensiune electrică, contactul regiunii $P$ constituind polul pozitiv, iar contactul corespunzător regiunii $N$ — polul negativ. După cum se observă, tensiunea ce apare la borne echivalează cu o polarizare directă a dispozitivului. Conectarea unei rezistențe electrice între terminalele celulei fotovoltaice (fig. 59) va da posibilitatea electro-

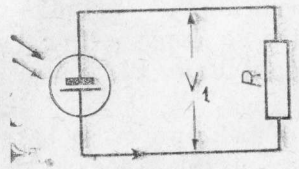



Fig. 59 — Circuit simplu cu celulă fotovoltaică.

nilor în exces din regiunea $N$ să se deplaseze prin circuitul exterior spre regiunea $P$, dînd naștere în acest fel unui curent electric. Remarcăm că acest curent datorat iluminării



*(fotocurent)* este de sens opus curentului ce apare în circuit în cazul polarizării directe cu o sursă externă. Prin urmare, dacă respectăm convenția făcută în cazul diodei semiconductoare unde curentul direct era considerat pozitiv, într-o diagramă curent-tensiune fotocurentul va trebui considerat ca avînd o valoare negativă.

Deoarece celula fotovoltaică are o structură de diodă, ea va trebui să aibă o comportare asemănătoare acesteia cînd nu este iluminată. Prin urmare, caracteristica curent-tensiune a unei celule fotovoltaice neiluminate trebuie să fie similară cu cea a unei diode (fig. 60, cazul $E = 0$).

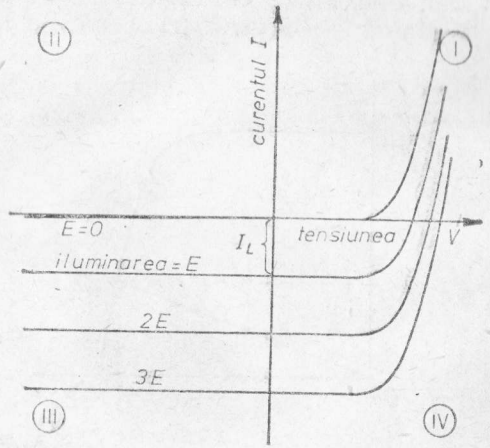



Fig. 60 — Caracteristica curent-tensiune pentru o celulă fotovoltaică.

Atunci cînd celula este iluminată, alura caracteristicii curent-tensiune se modifică (fig. 60, cazurile $E \neq 0$), ca prezentînd trei regiuni distincte:

— porțiunea din cadranul III reprezintă funcționarea în condițiile polarizării inverse;

— curba din cadranul IV arată modul în care curentul dintr-un circuit ca cel din figura 59 depinde de tensiunea la

bornele celulei, ea putînd fi obținută prin modificarea valorii rezistorului de sarcină $R$;

— porțiunea din cadranul I corespunde aplicării din exterior a unei tensiuni directe.

Pe măsura creșterii nivelului de iluminare curbele se vor deplasa în jos, distanțele dintre porțiunile drepte din cadranul trei fiind direct proporționale cu variația iluminării.

Pentru o celulă fotovoltaică este esențială funcționarea în condițiile absenței polarizării exterioare, corespunzătoare porțiunii din cadranul IV a caracteristicii curent-tensiune. Adesea se preferă ca la trasarea acestei caracteristici să nu se mai țină seama de convenția referitoare la sensul curentului electric, obținîndu-se în acest fel curba din figura 61.

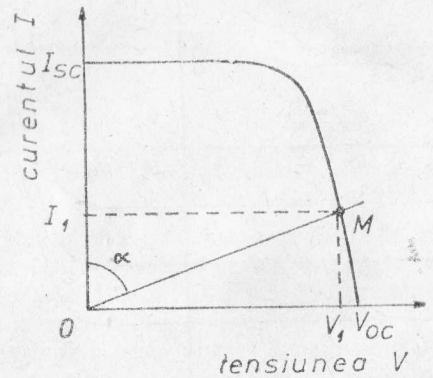



Fig. 61 — Porțiunea din cadranul IV a caracteristicii curent-tensiune a unei celule fotovoltaice.

Tensiunea ce poate fi măsurată la bornele celulei fotovoltaice atunci cînd ea nu este conectată în vreun circuit poartă numele de tensiune de circuit deschis ($V_{OC}$). Curentul ce străbate terminalele dispozitivului în timpul scurtcircuitării lor se numește curent de scurtcircuit ($I_{SC}$).

Unui rezistor $R$ plasat la bornele celulei fotovoltaice prin care trece un curent $I_1$, căderea de tensiune pe el fiind



$V_1$, îi va corespunde un punct de funcționare $M$ (fig. 61). Observăm că:

$$R = \frac{V_1}{I_1} = \operatorname{tg} \alpha; \qquad (59)$$

prin urmare alegerea punctului de funcționare definește în mod univoc valoarea rezistorului ce trebuie folosit.

Dacă dorim să utilizăm curentul debitat de o celulă fotovoltaică va trebui să folosim rezistoare de sarcină mici, iar dacă parametrul important este tensiunea, rezistorul de sarcină va trebui să aibă o valoare mare.

Cei doi parametri esențiali ai unei celule fotovoltaice ($I_{SC}$ și $V_{OC}$) depind în mod diferit de nivelul de iluminare (fig. 62).

Curentul de scurtcircuit variază liniar cu iluminarea, pe un domeniu foarte mare de valori ale acesteia (fig. 62 b), și

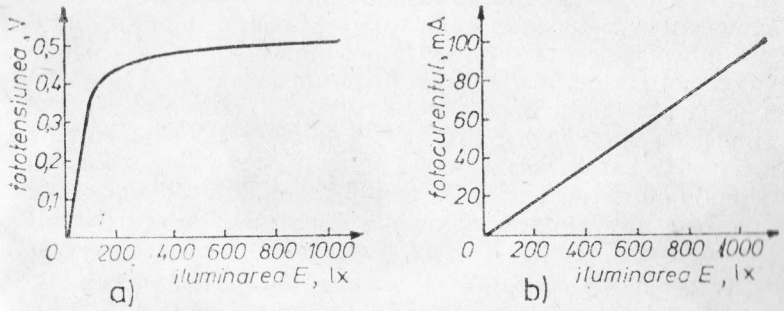



Fig. 62 — a) Dependența de iluminare a fototensiunii unei celule fotovoltaice; b) Dependența de iluminare a fotocurentului generat de o celulă fotovoltaică.

aproape liniar cu mărimea ariei fotosensibile. O iluminare mai puternică va determina mărirea vitezei de generare și ca urmare va conduce la creșterea numărului purtătorilor liberi ce pot fi orientați în unitatea de timp de cîmpul electric intern al joncțiunii. Creșterea ariei active în condițiile unei iluminări constante conduce la mărirea volumului în care

are loc generarea purtătorilor și, prin urmare, la o creștere corespunzătoare a numărului purtătorilor liberi ce pot participa la curent.

Variația tensiunii de circuit deschis cu iluminarea este foarte pronunțată la iluminări mici (fig. 62 a), observîndu-se apoi o tendință de saturare. Această alură rezultă din dependența logaritmică a lui $V_{OC}$ de curentul de scurtcircuit. Valoarea tensiunii de circuit deschis este practic independentă de mărimea ariei fotosensibile.

Valorile lui $V_{OC}$ și $I_{SC}$ depind în mod diferit și de temperatură: creșterea temperaturii are ca efect o mărire a valorii curentului de scurtcircuit și o micșorare a valorii tensiunii de circuit deschis. În cazul celulelor fotovoltaice cu siliciu scăderea lui $V_{OC}$ se face cu aproximativ 3 mV/grad, iar creșterea lui $I_{SC}$ este aproximativ 0,2%/grad.

Atunci cînd se utilizează pulsuri de lumină, este important să cunoaștem timpul în care curentul debitat crește de la valoarea zero (corespunzătoare absenței luminii) la o anumită valoare, precum și timpul în care curentul ajuns la valoarea maximă scade (după întreruperea pulsului luminos) pînă la o valoare mică. Aceste intervale temporale poartă numele de *timpi de răspuns* sau de *comutație*. Pentru a elimina intervenția ariei active, de a cărei mărime am văzut că depinde curentul, timpii de răspuns sînt definiți procentual în raport cu valoarea maximă a curentului de scurtcircuit (fig. 63).

Intervalul temporal dintre momentul aplicării pulsului de lumină ($t_1$) și momentul ($t_2$) în care curentul de scurtcircuit ajunge la 90% din valoarea sa maximă poartă numele de *timp de creștere* ($t_r$). Timpul scurs între momentul întreruperii iluminării ($t_3$), cînd $I_{SC}$ avea valoarea maximă și momentul ($t_4$) cînd curentul de scurtcircuit scade la 10% din această valoare se numește *timp de scădere* ($t_f$). De regulă, pentru același dispozitiv, $t_r = t_f$. Avînd în vedere procesele fizice ce conduc la apariția curentului printr-o celulă fotovoltaică, timpii de răspuns vor indica rapiditatea atingerii stării staționare ($t_r$) și viteza de revenire la echilibru termodinamic după încetarea acțiunii agentului perturbator (luminii) — $t_f$.



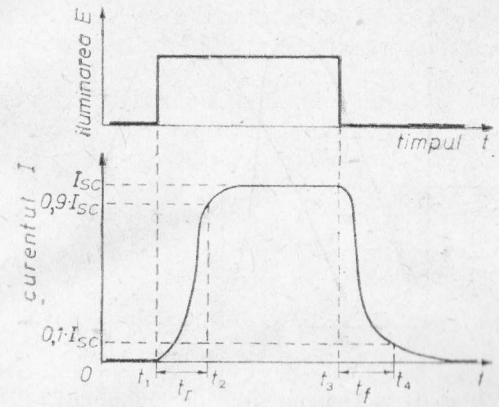



Fig. 63 — Timpii de răspuns ai unei celule fotovoltaice.

Valorile timpilor de răspuns în cazul celulelor fotovoltaice sînt de ordinul microsecundelor, depinzînd de valoarea capacității electrice a dispozitivului; la capacități mari vor corespunde timpi de răspuns mari și invers. Deoarece la rîndul ei această capacitate electrică este direct proporțională cu aria joncțiunii, ariilor active mari le corespund timpi de răspuns mari.

Atît valorile lui $I_{SC}$ cît și cele ale lui $V_{OC}$ depind de lungimea de undă a luminii incidente pe suprafața fotosensibilă. Luarea în considerație a acestei dependențe se face prin intermediul *sensibilității spectrale relative* ($S$) care se definește ca raport între valoarea curentului de scurtcircuit la o anumită lungime de undă și valoarea maximă a curentului de scurtcircuit în condițiile în care fluxul de fotoni este același pe tot domeniul lungimilor de undă considerate. Deoarece adîncimea de pătrundere a luminii într-un semiconductor și viteza de generare a purtătorilor depind de lungimea de undă a luminii, în caracteristica spectrală a unei celule fotovoltaice trebuie să se facă simțită o asemenea

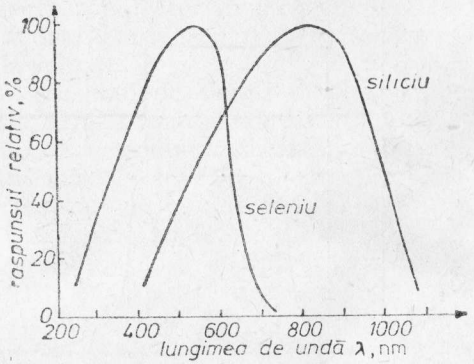



Fig. 64 — Dependența de lungimea de undă a luminii a răspunsului relativ pentru celule fotovoltaice cu seleniu și cu siliciu.

dependență (fig. 64). După cum se observă în figura 64, răspunsul spectral depinde puternic de materialul semiconductor utilizat la fabricarea celulelor fotovoltaice; dispozitivele cu seleniu au maximul sensibilității spectrale în zona verde a spectrului, în timp ce acelea cu siliciu — în infraroșul apropiat.

Utilizarea unor tehnologii speciale poate conduce la modificări ale alurii caracteristicii spectrale. De exemplu, în cazul celulelor fotovoltaice cu siliciu se poate obține o creștere a răspunsului în regiunea violetă și albastră a spectrului ($\lambda = 400 - 500$ nm) utilă în anumite categorii de aplicații.

Cele mai utilizate celule fotovoltaice sînt cele realizate pe seleniu și pe siliciu, celulele cu siliciu avînd avantajul stabilității mai mari în timp a parametrilor optoelectrici.

Celulele fotovoltaice au o gamă extrem de largă de aplicații: măsurarea intensității luminii, elemente de comandă în circuite de măsură și control, traductoare în scheme de automatizări. Vom prezenta unele din ele în ultimul capitol. Acum ne vom opri asupra unei utilizări frecvente a celulelor fotovoltaice: citirea „pistei sonore" înregistrate optic pe filmele cinematografice.



Pelicula are de-a lungul său o pistă sonoră de cîțiva milimetri lățime, sub forma unei benzi negre sinuoase a cărei formă și grosime determină reproducerea sunetelor ce însoțesc imaginile respective.

Schema instalației de citire a sunetului este dată în figura 65. Un sistem optic proiectează pe film imaginea luminoasă

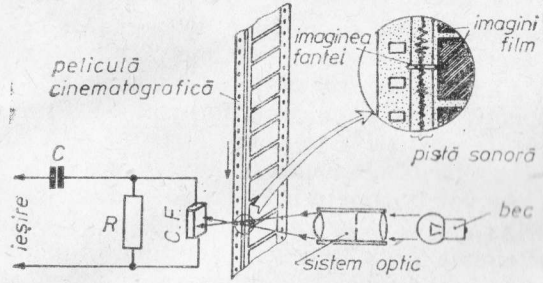



Fig. 65 — Citirea pistei sonore a peliculei cinematografice cu o celulă fotovoltaică.

a unei fante foarte înguste (aproximativ 10 μm). Fasciculul luminos ce trece prin peliculă este recepționat de o celulă fotovoltaică care determină apariția prin rezistorul $R$ a unui curent proporțional cu iluminarea. Pelicula deplasîndu-se, provoacă modificări periodice ale intensității luminii incidente pe celulă, în funcție de frecvența și amplitudinea sunetului înregistrat pe film. Aceste modificări se traduc prin variații ale curentului prin rezistorul $R$. Ele sînt transmise prin capacitorul $C$ la un amplificator de audiofrecvență și în cele din urmă ajung la un difuzor care reproduce sunetele.

Multă vreme s-au folosit celulele fotoelectrice pentru citirea pistei sonore a filmelor, însă la ora actuală ele au fost înlocuite pe scară largă cu celule fotovoltaice. În comparație cu celulele fotoelectrice, celulele fotovoltaice prezintă două mari avantaje: timpul lor de viață este mult mai mare și nu necesită polarizare exterioară. Ne amintim că în cazul celulelor fotoelectrice tensiunea ce trebuia aplicată era de ordinul a 100 V.

## CELULA SOLARĂ

Destinate conversiei directe a energiei luminii solare în energie electrică, celulele solare suscită în prezent un interes deosebit. Materialele semiconductoare ce pot fi utilizate la realizarea lor sînt numeroase, însă, după cum vom vedea, la ora actuală siliciul se dovedește a fi cel mai avantajos.

Celulele solare sînt dispozitive fotovoltaice ce au aria suprafeței active de ordinul centimetrilor sau zecilor de centimetri pătrați. Ele prezintă o joncțiune $P$—$N$ și își bazează funcționarea pe efectul fotovoltaic. Prin urmare, mecanismul de apariție a tensiunii la borne și a curentului va fi același ca în cazul celulelor fotovoltaice. Ca și acestea, celulele solare vor fi caracterizate de doi parametri optoelectrici importanți: tensiunea de circuit deschis ($V_{OC}$) și curentul de scurtcircuit ($I_{SC}$). Definițiile acestor parametri precum și dependența lor de nivelul de iluminare și de valoarea ariei fotosensibile sînt aceeași ca în cazul celulelor fotovoltaice.

Parametrul principal ce definește calitatea unei celule solare este *randamentul de conversie* ($\eta$); el reprezintă raportul dintre puterea electrică maximă furnizată de celulă ($P_m$) și puterea radiantă incidentă pe suprafața fotosensibilă ($P_{in}$):

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}}. \qquad (60)$$

Prin $V_m$ și $I_m$ s-au notat coordonatele punctului $N$ de pe caracteristica voltamperică (fig. 66) ce corespunde puterii maxime pe care o poate debita celula solară.

După cum se poate observa din tabelul 4, randamentul de conversie cel mai mare s-a obținut în cazul celulelor solare realizate pe arseniura de galiu (GaAs). Datorită prețului mare al acestui material semiconductor, cît și tehnologiei de realizare mai puțin avansată decît în cazul altor materiale semiconductoare, costul celulelor solare cu GaAs este foarte ridicat. Acesta este principalul motiv pentru care actualmente nu celulele solare cu GaAs cunosc cea mai mare răspîndire, ci acelea realizate pe bază de siliciu. Ca și în cazul diodelor, tranzistoarelor și celulelor fotovoltaice,



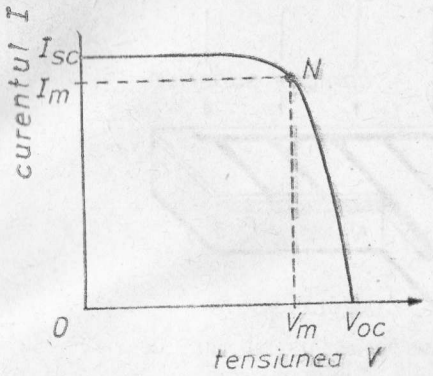



Fig. 66 — Caracteristică voltamperică a unei celule solare.

| Materialul de bază | Randamentul de conversie (%) | $I_{SC}$/cm² (mA/cm²) | $V_{OC}$ (mV) | Condiții de testare |
|---|---|---|---|---|
| Si | 12 | 30 | 590 | AM1 |
| GaAs | 20 | 27 | 930 | AM1 |
| CdTe/CdS | 7 | 17 | 500 | AM1 |
| $Cu_2S$/CdS | 4,5 | 15 | 475 | AM1 |

*TABELUL 4.* Performanțe medii ale celulelor solare realizate pe diferite materiale semiconductoare.

siliciul utilizat este *monocristalin*, adică prezintă o anumită orientare a planelor în care sînt dispuși atomii ce constituie cristalul semiconductor.

Celulele solare cu siliciu monocristalin se realizează prin tehnologie planară, valoarea mare a ariei lor fotosensibile și curentul intens pe care-l generează (de ordinul zecilor și sutelor de miliamperi) determinînd unele particularități constructive ale acestora în raport cu celulele fotovoltaice.

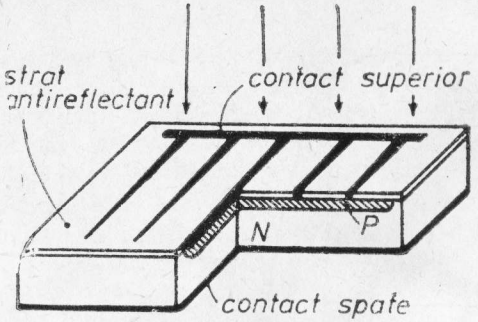



Fig. 67 — Secțiune printr-o structură de celulă solară.

O secțiune printr-o celulă solară cu geometrie pătratică este prezentată în figura 67. Grila metalică de contact de pe suprafața activă are rolul de a mări eficiența de colectare a purtătorilor fotogenerați și de a micșora *rezistența serie* a celulei (definită ca rezistența electrică pe care dispozitivul însuși o opune trecerii curentului electric). Datorită stratului antireflectant, numai aproximativ 10% din fluxul luminos incident este reflectat pe suprafața activă a dispozitivului; absența acestui strat ar face ca pierderea prin reflexie să fie în jur de 35%.

Celulele solare sînt destinate atît utilizărilor spațiale (ca sursă de energie electrică pentru aparatura electronică a sateliților, navelor și stațiilor cosmice), cît și celor terestre. Din figura 68 se observă diferența ce există între compoziția spectrală a luminii solare în afara atmosferei terestre (AM0) și la sol (AM1). Datorită absorbției atmosferice, puterea incidentă a luminii la nivelul solului (100 mW/cm$^2$) este mai mică decît în condiții AM0(140 mW/cm$^2$).

Utilizarea celulelor solare în exteriorul atmosferei necesită o rezistență mărită la acțiunea radiațiilor cosmice și o adaptare corespunzătoare spectrului solar AM0. Folosirea lor la nivelul solului implică o bună adaptare la spectrul AM1 și protejarea structurilor semiconductoare față de acțiunea mediului înconjurător printr-o încapsulare adecvată. Adap-



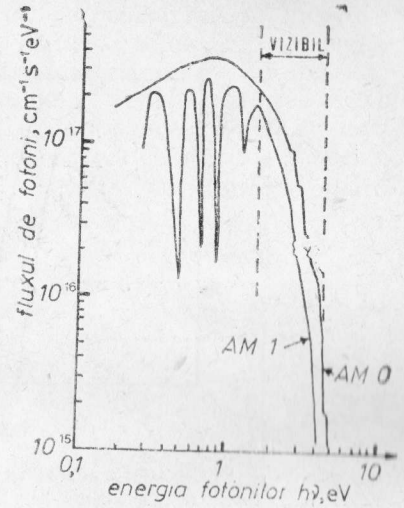



Fig. 68 — Compoziția spectrală a luminii solare.

tarea se referă în special la alegerea adîncimii joncțiunii, astfel încît cîmpul electric intern să poată prelua o parte cît mai mare din purtătorii care, datorită spectrului larg al luminii solare, sînt fotogenerați în tot volumul dispozitivului.

Celulele solare ce se fabrică în prezent au forma pătrată, circulară sau semicirculară, alegerea geometriei fiind la latitudinea producătorului. Tendința este de a fabrica celule cu suprafața cît mai mare în scopul obținerii unor valori cît mai ridicate a curentului debitat de ele.

Obținerea unor generatoare electrice, bazate pe efectul fotovoltaic, cu putere mare la ieșire implică asamblarea celulelor solare în *module*. Asamblarea se poate face prin legarea celulelor în serie, paralel sau mixt, în funcție de necesitățile de utilizare. În figura 69 se prezintă caracteristicile curent-tensiune pentru două celule solare cu curenți de scurtcircuit diferiți și caracteristica rezultată în urma conectării lor în serie. Se observă că valoarea curentului ansamblului este limitată de valoarea cea mai mică a curentului celulelor înseriate, în timp ce tensiunea este suma

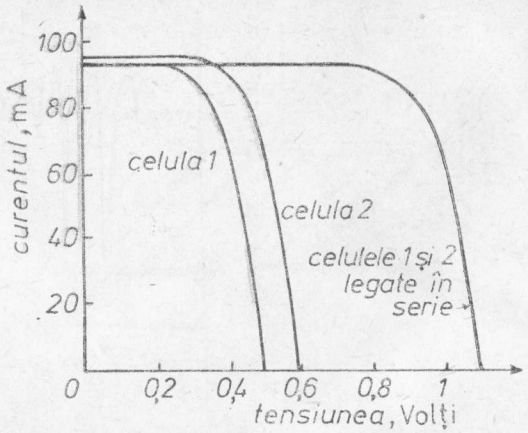



Fig. 69 — Caracteristici voltamperice a două celule solare și caracteristica ansamblului format prin înserierea lor.

tensiunilor individuale. Prin urmare, la asamblarea serie a celulelor solare, în scopul realizării modulelor de tensiuni mari, este necesar ca valorile curenților de scurtcircuit să fie cît mai apropiate la o iluminare dată. În caz contrar, curentul debitat de un asemenea modul va fi cel mai mic curent al celulelor componente.

La rîndul lor și modulele pot fi grupate în ansambluri mai mari (panouri). În prezent există panouri de celule solare capabile să furnizeze puteri de sute de wați fără a utiliza concentratoarele.

Costul relativ ridicat al celulelor solare pe bază de siliciu monocristalin este principalul impediment în utilizarea acestora pe scară largă. Scăderea prețului/watt al energiei electrice obținute prin conversia energiei luminii solare cu celule realizate pe siliciu monocristalin se poate face prin concentrarea luminii solare pe suprafața activă cu ajutorul lentilelor (de obicei lentile Fresnel) sau al oglinzilor concave



(parabolice, sferice) (fig. 70). O asemenea metodă permite obținerea de puteri electrice mari cu celule de arie mică (deci cu preț mai mic); curentul foarte intens ce străbate în acest caz celula ridică însă probleme legate de răcirea ei. O răcire neadecvată face ca celula să funcționeze cu performanțe reduse, putînd duce chiar la distrugerea ei. Răcirea celulelor solare ce lucrează în regim de concentrare a luminii solare poate fi făcută pasiv sau activ. În primul caz micșorarea

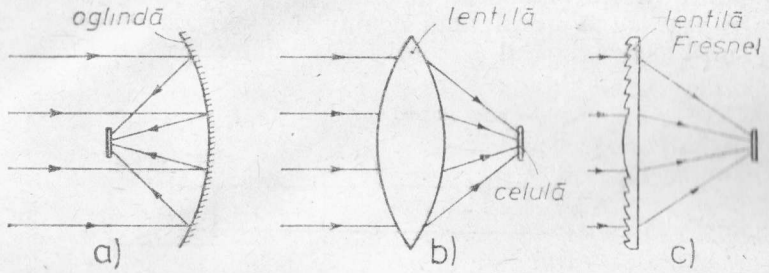



Fig. 70 — Concentratori simpli pentru celule solare: a) oglindă concavă; b) lentilă obișnuită; c) lentilă Fresnel;

temperaturii celulelor se face prin circulația liberă a aerului atmosferic. Răcirea activă necesită un circuit închis prin care circulă un lichid, căldura preluată de la celulele solare putînd fi utilizată în alte scopuri.

Pentru o funcționare eficientă a sistemelor cu concentrare, este necesară orientarea lor astfel încît să primească în tot cursul zilei lumina sub incidență normală (perpendicular pe suprafața fotosensibilă). Orientarea se face în general automat.

Prețul/watt de energie electrică se poate reduce și prin utilizarea unui material semiconductor mai ieftin, cu condiția ca randamentul de conversie al celulelor realizate să fie acceptabil. Un astfel de material este siliciul policristalin, celulele solare realizate pe acesta (neintrate deocamdată în

producția de serie) avînd randamente de 8—10% și arii fotosensibile foarte mari (ajungînd pînă la 100 cm²).

Celulele solare reprezintă o sursă nepoluantă de energie electrică. Ele au o fiabilitate ridicată, putînd funcționa timp îndelungat fără supraveghere.

O problemă importantă legată de utilizarea celulelor solare este stocarea energiei electrice produse. Aceasta pentru a permite funcționarea aparaturii alimentate și în timpul nopții sau în perioadele înnorate. În mod obișnuit stocarea se face cu ajutorul unui acumulator electric plasat între sursă (celulă, modul, panou) și consumator (fig. 71). O diodă

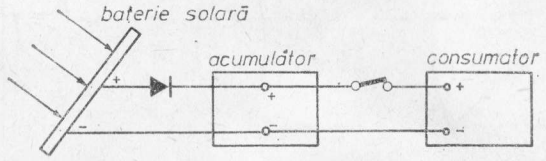



Fig. 71 — Utilizarea unui panou cu celule solare pentru alimentarea cu energie electrică.

montată în circuit împiedică descărcarea acumulatorului prin debitare pe celule în perioadele de nefuncționare a generatorului. Dacă se utilizează un element de acumulator cu plumb sînt necesare minim cinci celule montate în serie.

Sistemele cu un consum foarte mic de energie, cum sînt ceasurile de mînă cu afișaj pe bază de cristale lichide sau minicalculatoarele, care necesită puteri sub 1 mW pot fi alimentate de celule solare de arie redusă. În acest caz energia electrică este stocată în acumulatoare alcaline miniaturizate de dimensiunile unei pastile de antinevralgic.

Modulele de celule solare pot alimenta aparatură cu consum mai mare: radioreceptoare, minicalculatoare ce afișază cu *LED*-uri sau tuburi Nixie, mici motoare electrice etc.

Panourile de module pot alimenta stații meteo izolate, stații de retransmitere radio sau TV aflate în locuri greu accesibile, balize marine, faruri de coastă etc.



## FOTODIODA

Acest tip de dispozitiv optoelectronic prezintă o joncțiune *P—N*, are aria activă mică (de ordinul milimetrilor pătrați) și se utilizează în regim polarizat, la tensiuni inverse relativ mari. Între fotodiodă și o diodă obișnuită există două deosebiri constructive importante:

a) Capsula diodelor semiconductoare este opacă (exceptînd cazul acelora încapsulate în sticlă, unde efectul luminii este neglijabil datorită dimensiunilor foarte mici ale structurii), în timp ce la fotodiode existența unei zone transparente a capsulei, pentru pătrunderea luminii, este esențială;

b) La o diodă semiconductoare, toată suprafața zonei difuzate este acoperită cu un strat metalic ce constituie unul din electrozi, în timp ce la o fotodiodă această suprafață este acoperită cu un strat antireflectant (ca este zona fotosensibilă a dispozitivului, colectarea purtătorilor din regiunea difuzată fiind realizată cu ajutorul unei metalizări inelare — figura 72).

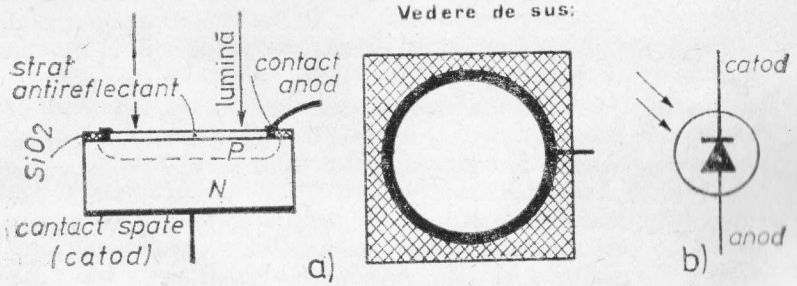



Fig. 72 — a) Structura unei fotodiode; b) simbolul fotodiodei în schemele electronice.

După cum se observă din figura 73, caracteristica curent-tensiune a unei fotodiode este asemănătoare cu cea a unei celule fotovoltaice, procesele fizice care o determină fiind aceleași în cazul ambelor dispozitive. Fotodiodele nu se utilizează în regim fotovoltaic (cadranul IV), ci în condițiile

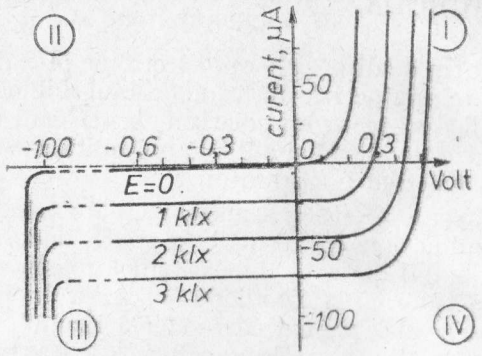



Fig. 73 — Caracteristici curent-tensiune pentru o fotodiodă la diverse nivele de iluminare.

aplicării la borne a unei tensiuni inverse (cadranul III). Curentul invers poartă în acest caz numele de *curent de iluminare* ($I_L$) și are valori mult mai mari decît ale curentului invers $I_D$ în absența iluminării. Curentul $I_D$ se numește *curent de întuneric*.

Curentul de iluminare este proporțional cu fluxul luminos incident pe suprafața fotosensibilă, fiind independent de valoarea tensiunii inverse pînă în apropierea tensiunii de străpungere.

În cazul fotodiodelor cu siliciu (material preferat pentru realizarea acestor dispozitive), tensiunile de străpungere sînt de ordinul zecilor și sutelor de volți.

Este util să remarcăm că dacă utilizarea fotodiodelor în regim fotovoltaic este neavenită (datorită curenților mici furnizați), folosirea celulelor fotovoltaice în locul fotodiodelor este adesea posibilă. În acest scop vor trebui selectate exemplare de celule fotovoltaice care au curentul de întuneric mic și tensiunea de străpungere suficient de mare.

În figura 74 se indică modul în care se trasează *dreapta de sarcină* în cazul celor două moduri posibile de utilizare.

Dacă fotodiodei i se aplică o polarizare inversă, dreapta de sarcină se obține prin unirea punctului de pe axa tensiu-



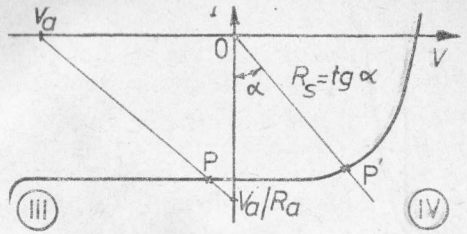



Fig. 74 — Trasarea dreptei de sarcină la o fotodiodă.

nilor corespunzător tensiunii $V_a$ aplicate, cu punctul corespunzător valorii $-V_a/R_a$, $R_a$ fiind rezistența „anodică" legată în serie cu dispozitivul. Punctul de funcționare $P$ se află la intersecția dreptei de sarcină cu caracteristica curent-tensiune corespunzătoare nivelului de iluminare la care se lucrează.

În cazul în care fotodioda este totuși utilizată ca celulă fotovoltaică, punctul de funcționare $P'$ se află la intersecția curbei din cadranul IV, corespunzătoare nivelului de iluminare la care se lucrează, cu o dreaptă ce trece prin origine și face cu axa curenților un unghi a cărui tangentă este egală cu valoarea rezistenței de sarcină pe care debitează dispozitivul.

O proprietate esențială a fotodiodelor este timpul de răspuns mai redus, la arii fotosensibile egale, decît al celulelor fotovoltaice sau al fototranzistoarelor. Aceasta se datorează micșorării capacității joncțiunii atunci cînd i se aplică o polarizare inversă (fig. 75). Pentru înțelegerea acestui fenomen vom asimila din nou joncțiunea cu un capacitor plan. Creșterea tensiunii inverse aplicate conduce la lărgirea regiunii de sarcină spațială $W$ și, conform relației (46), capacitatea electrică scade, iar constanta de timp a circuitului se micșorează. Timpii de răspuns ai fotodiodelor cu siliciu sînt de ordinul microsecundei.

Pentru a răspunde la semnale luminoase cu frecvențe mai ridicate s-au realizat fotodiodele Schottky și fotodiodele *P—I—N*.

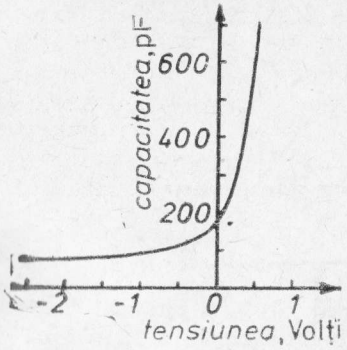



Fig. 75 — Dependența de tensiune a capacității unei fotodiode.

Fotodioda *Schottky* este formată dintr-un strat metalic depus pe suprafața unui material semiconductor, metalul fiind astfel ales încît să formeze cu semiconductorul un contact redresor. Funcționarea acestui tip de fotodiodă este asemănătoare cu a celei cu joncțiune realizată prin difuzie, însă lipsa stocării sarcinilor electrice conduce la valori foarte mici a timpilor de comutație (sub o nanosecundă).

Fotodiodele *P—I—N* permit lucrul cu frecvențe ale semnalului luminos cu două-trei ordine de mărime mai mari decît în cazul fotodiodelor obișnuite. O asemenea fotodiodă are între zona *P* și zona *N* o regiune semiconductoare intrinsecă *I*. Se asigură astfel o distanțare mai mare între regiunea *P* și regiunea *N*, capacitatea dispozitivului micșorîndu-se considerabil.

În continuare vom enumera și defini pe scurt principalii parametri ai unei fotodiode, pentru ca cititorul să poată folosi mai ușor datele de catalog ale acestor dispozitive.

1. *Sensibilitatea* (*S*) este raportul dintre valoarea curentului invers și valoarea iluminării la care se obține acest curent, la o anumită tensiune inversă aplicată. Se măsoară în nA/lx sau în mA/lm.
2. *Tensiunea inversă* ($V_R$) este tensiunea pînă la care dispozitivul poate fi utilizat în circuit, garantîndu-se buna lui funcționare.



3. *Curentul de întuneric* ($I_D$) este indicat de producător la o anumită valoare a tensiunii inverse.
4. *Timpul de creștere* ($t_r$) și de scădere ($t_f$) reprezintă intervalul temporal în care curentul variază de la 10% la 90% și, respectiv, de la 90% la 10% din valoarea finală, la iluminare cu un puls luminos dreptunghiular (fig. 76).

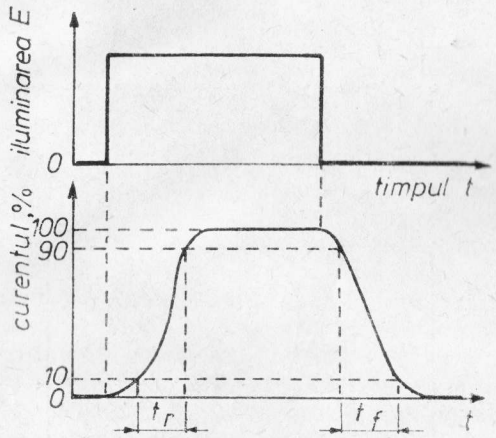



Fig. 76 — Timpii de răspuns ai unei fotodiode.

5. *Sensibilitatea spectrală* ($S_\lambda$) indică răspunsul fotodiodei la diferite lungimi de undă ale luminii incidente. De obicei se dă sub formă de grafic. Alura tipică a unui asemenea grafic este arătată în figura 77 pentru o fotodiodă cu siliciu și una cu germaniu.
6. *Caracteristica de directivitate* a unei fotodiode reprezintă variația relativă a curentului acesteia în funcție de unghiul de incidență a luminii pe suprafața fotosensibilă. O asemenea caracteristică este prezentată în figura 78 pentru o fotodiodă cu fereastră plană și pentru una cu lentilă. Se observă directivitatea mai pronunțată a fotodiodelor cu lentilă.

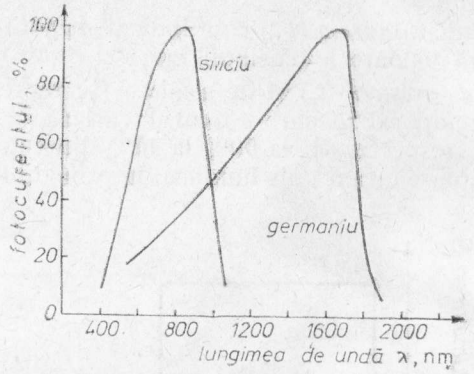



Fig. 77 — Răspunsul spectral al fotodiodelor cu siliciu și germaniu.

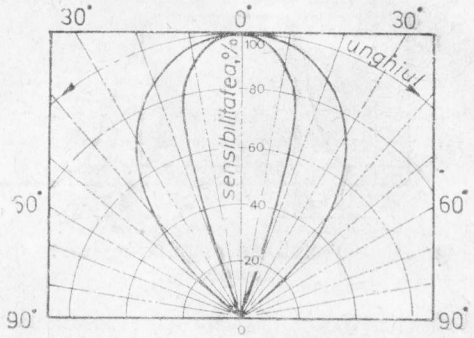



Fig. 78 — Caracteristici de directivitate pentru fotodiodă; curba mai largă corespunde unei capsule cu fereastră plană de sticlă.

Fotodiodele își găsesc aplicații în circuite de comandă, control și în diverse montaje de automatizare. Folosirea fotodiodelor la realizarea tuburilor captatoare de imagine reprezintă poate cea mai spectaculoasă utilizare a lor. Aceste tuburi au rolul de a converti informația purtată de lumină într-o informație electrică, ele reprezentînd partea esențială a unei camere de luat vederi.



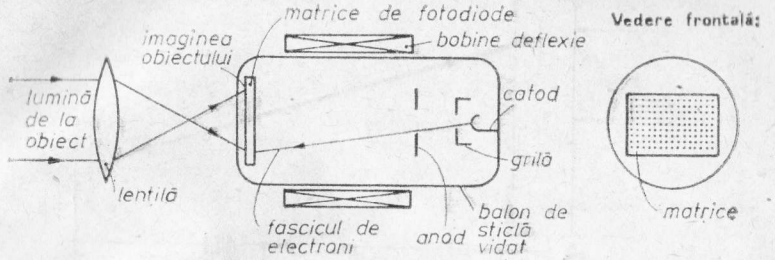



Fig. 79 — Alcătuirea schematică a unui tub captator de imagine cu matrice de fotodiode.

În figura 79 se indică alcătuirea de principiu a unui tub captator de imagine, întregul ansamblu fiind introdus într-o incintă vidată din sticlă. În partea stîngă, imediat după lentilă, se află o matrice de fotodiode (care constituie suprafața fotosensibilă a tubului) de formă dreptunghiulară. În acest dreptunghi, fotodiodele sînt distribuite uniform, diametrul lor fiind de 5—6 μm. Datorită dimensiunilor extrem de mici, densitatea fotodiodelor în matrice este extrem de mare — de ordinul sutelor de mii pe centimetrul pătrat. Toate aceste dispozitive se realizează simultan prin tehnologie planară pe o plachetă de siliciu.

Pe suprafața plachetei dinspre exteriorul tubului se proiectează imaginea optică, în timp ce suprafața dinspre interior (ce conține fotodiodele) este parcursă periodic (baleiată) de un fascicul de electroni foarte bine focalizat. Restul tubului conține electrozi pentru producerea, accelerarea, concentrarea și deplasarea pe orizontală și verticală a acestui fascicul electronic.

Vom descrie funcționarea unui astfel de tub urmărind figura 80 în care au fost reprezentate doar două din fotodiodele matricii.

Atunci cînd fasciculul de electroni baleiază, linie după linie, diodele matricii, el conectează succesiv la masă regiunile lor de tip *P*. Deoarece la masă este legat polul negativ al sursei (aproximativ zece volți), rezultă o polarizare inversă

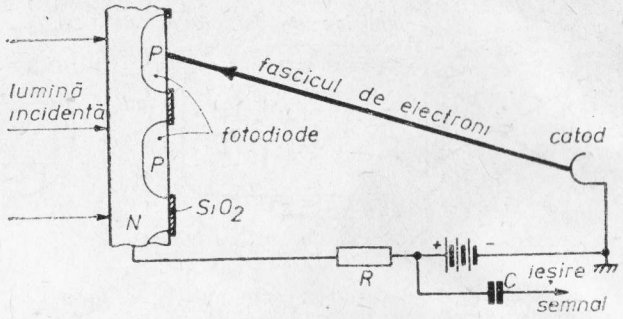



Fig. 80 — Schemă pentru explicarea funcționării tubului captator de imagine cu matrice de fotodiode.

a tuturor diodelor. După o primă baleiere, capacitățile tuturor diodelor vor fi încărcate la o tensiune egală cu cea a sursei și prin urmare ele vor stoca cantități egale de electricitate.

Regiunea $N$ a plachetei este supusă acțiunii luminii, pe ea formîndu-se imaginea optică. Fotonii absorbiți în această regiune creează perechi electron-gol; o parte din goluri reușind să ajungă la regiunea de tip $P$ produce neutralizarea parțială sau totală a sarcinii acumulate în capacitatea joncțiunii. Deoarece imaginea este constituită din zone diferit iluminate, descărcarea diodelor va fi mai pronunțată sau mai redusă. Dacă porțiunea de pe suprafața opusă regiunii $P$ a unei diode este puternic iluminată, curentul în acea zonă va fi mare, iar capacitatea acestei diode total descărcată. Atunci cînd această porțiune va fi neiluminată (zonă neagră a imaginii) nu se vor genera purtători în domeniul adiacent, iar dioda ce-i corespunde va rămîne încărcată.

Cînd fasciculul electronic atinge o diodă, el o reîncarcă la potențialul negativ al sursei. Curentul absorbit de la sursă pentru încărcare va diferi de la o diodă la alta deoarece ele nu sînt uniform descărcate sub acțiunea fluxului luminos al imaginii. Dacă o diodă va fi complet descărcată, curentul absorbit pentru reîncărcarea ei va fi mai mare, în timp ce dacă una din diode este încărcată, în momentul atingerii ei



de către spotul electronic sursa nu va trebui să furnizeze nici un curent.

Deoarece este posibilă o gamă largă de iluminări intermediare, sursa va furniza succesiv diverși curenți necesari reîncărcării, aceștia producînd căderi corespunzătoare de tensiune pe rezistorul $R$. Datorită faptului că baleierea matricii de fotodiode este făcută extrem de rapid de către fasciculul electronic, aceste tensiuni variabile se vor succeda pe rezistorul $R$ în același ritm, obținîndu-se astfel semnalul video.

Semnalul video este preluat prin capacitorul $C$, amplificat și completat cu impulsuri de sincronizare ce marchează momentul începerii explorării unei noi linii și a unui nou cadru. Acest semnal complex modulează apoi frecvența radiației electromagnetice care este transmisă în spațiu de către emițătorul de televiziune.

Sensibilitatea spectrală a tubului captator de imagine cu matrice de fotodiode cu siliciu acoperă domeniul 350—1 000 nm (fig. 81). Observăm că performanțele sale sînt superioare tubului VIDICON a cărui țintă este fotoconductivă.

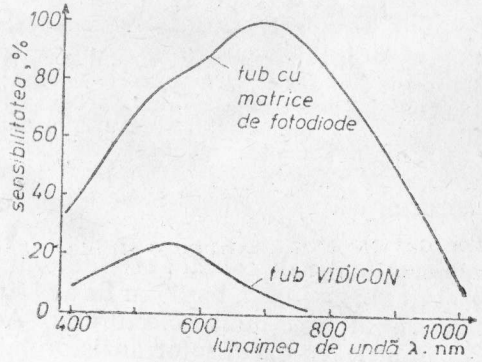



Fig. 81 — Răspuns spectral pentru două tipuri de camere de luat vederi ce au ca țintă elemente semiconductoare.

## FOTOTRANZISTORUL

Dispozitiv semiconductor sensibil la lumină, fototranzistorul prezintă, ca și tranzistorul, două joncțiuni. Funcționarea sa se bazează pe efectul fotoelectric intern și pe proprietatea de amplificare în curent a tranzistorului. De cele mai multe ori nu se conectează terminal la regiunea bazei, dispozitivul prezentînd numai terminalele corespunzătoare emitorului și colectorului.

În circuitele electronice fototranzistorul se montează de preferință cu emitorul comun. Ca la orice tranzistor, joncțiunea emitor-bază este polarizată direct, iar joncțiunea bază-colector invers. Dacă fototranzistorul nu are contact de bază, la conectarea în circuit a unui fototranzistor de tip *NPN* se respectă polaritatea indicată în figura 82. În cazul unui tranzistor de tip *PNP* polaritatea trebuie inversată.

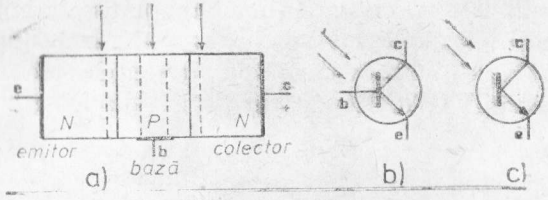



Fig. 82 — a) Conectarea în circuit a unui fototranzistor *NPN* fără contact de bază; b) simbolul fototranzistorului cu contact de bază; c) simbolul fototranzistorului fără contact de bază.

În cele ce urmează ne vom referi la fototranzistoare de tipul *NPN*.

La întuneric, curentul de colector este datorat electronilor care sînt injectați din emitor în bază, iar de aici sînt antrenați de cîmpul intern al joncțiunii colectorului. Acest curent ($I_{CEO}$) poartă numele, în cazul fototranzistorului, de curent de întuneric $-I_D$. El are valoarea

$$I_D = \beta I_{CBO}, \tag{61}$$



$\beta$ fiind factorul static de amplificare în curent, iar $I_{CBO}$ — curentul rezidual al joncțiunii bază-colector la întuneric.

Structura unui fototranzistor *NPN* realizat prin tehnologie planară este schițată în figura 83. Se adoptă o soluție constructivă care să permită o iluminare cît mai bună a regiunii bazei, suprafața acesteia fiind acoperită cu un strat antireflectant.

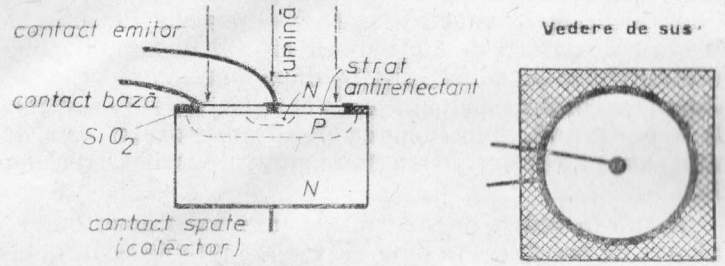



Fig. 83 — Structură de fototranzistor.

Simbolurile utilizate pentru reprezentarea fototranzistoarelor, cu și fără contact de bază, în schemele electronice sînt indicate în figura 82 b, c.

Funcționarea unui fototranzistor este analoagă cu cea a unui tranzistor, curentul de bază fiind datorat în acest caz purtătorilor liberi fotogenerați în bază.

Simularea unui fototranzistor se poate face în modul indicat în figura 84. Sub acțiunea luminii curentul invers al fotodiodei crește, mărind astfel curentul ce intră în baza

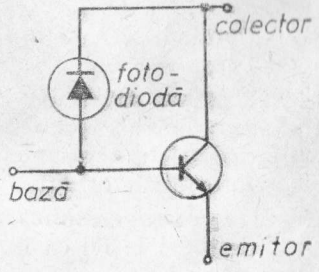



Fig. 84 — Montaj simplu pentru simularea unui fototranzistor.

tranzistorului. Prin urmare, iluminări diferite ale fotodiodei vor conduce la diverse valori ale curentului de colector al tranzistorului, ansamblul comportîndu-se ca un fototranzistor.

Principalul avantaj al fototranzistorului este sensibilitatea mare la lumină, de zeci sau sute de ori mai mare decît a unei fotodiode realizate pe același material semiconductor și cu aceeași arie fotosensibilă. Ca dezavantaj față de fotodiodă menționăm valoarea mare a curentului de întuneric. Aceasta se datorează faptului că efectul de amplificare al fototranzistorului se face simțit, după cum am menționat, și asupra curentului rezidual. Deoarece valoarea lui $I_{CEO}$ depinde de temperatură, funcționarea fototranzistorului este mai mult afectată de creșterea temperaturii decît cea a fotodiodei.

Avînd în vedere aceste considerente, fototranzistoarele se folosesc cu precădere în montaje în care trebuie sesizată doar prezența sau absența luminii și nu o discriminare precisă a nivelelor de iluminare.

Principalii parametri ai unui fototranzistor, exceptînd pe $I_D$ definit mai sus, sînt următorii:

1 — *Sensibilitatea* ($S$) se definește ca raport între intensitatea curentului de colector și valoarea iluminării care îl determină la o tensiune $V_{CE}$ dată. Se măsoară în μA/lx sau în mA/lm.

2 — *Tensiunea maximă de colector-emitor* ($V_{CEO\,max}$) este tensiunea maximă la care poate fi polarizat fototranzistorul fără a-l deteriora.

3 — *Curentul de iluminare* ($I_L$) este curentul de colector la iluminarea $E$ și la o tensiune $V_{CEO}$ indicate de producător.

4 — *Puterea totală disipată maximă* ($P_{max}$) este puterea maximă ce poate fi disipată sub formă de căldură de dispozitiv; depășirea valorii indicate duce la deteriorarea fototranzistorului.

5 — *Timpii de răspuns* ($t_r$, $t_f$) și *sensibilitatea spectrală* se definesc la fel ca în cazul fotodiodei.



O familie de caracteristici curent de colector/tensiune emitor-colector a unui fototranzistor este prezentată în figura 85. Se remarcă asemănarea cu caracteristica de ieșire a unui tranzistor obișnuit, deosebirea constînd în aceea că rolul parametrului „curent de bază" îl joacă aici iluminarea $E$. Dreapta de sarcină și punctul de funcționare se construiesc în același mod ca la tranzistor.

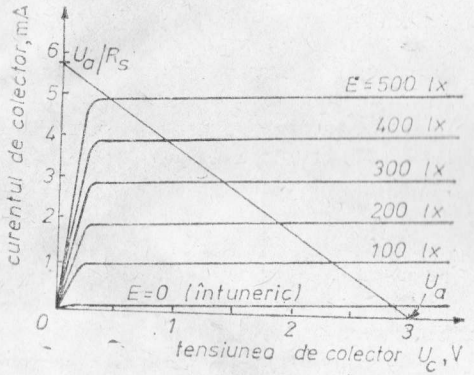



Fig. 85 — Familie de caracteristici curent-tensiune pentru un fototranzistor la diverse nivele de iluminare.

Se fabrică o mare varietate de fototranzistoare, cu diverși parametri electrici. În aplicații se alege un tip sau altul în funcție de necesități și ținînd seama de parametrul cel mai important în cazul dat. Există o intercondiționare a performanțelor, unii parametri putînd avea valori „bune" în dauna altora. Astfel, o sensibilitate mare obținută prin creșterea ariei fotosensibile conduce la o capacitate proprie mare și la timpi de comutație ridicați. Un factor de amplificare mare înseamnă creșterea sensibilității, dar mărește atît curentul de întuneric, cît și timpii de comutație.

Folosirea unei capsule prevăzute cu lentilă pentru concentrarea luminii pe suprafața fotosensibilă mărește (de zeci de ori) sensibilitatea, însă unghiul de acceptare a luminii

scade puternic, aceste dispozitive avînd o directivitate foarte pronunțată.

Unele firme produc ansambluri de componente electronice, reunite în aceeași capsulă, a căror funcționare este asemănătoare unui fototranzistor. Vom prezenta în continuare trei astfel de dispozitive compuse care pot fi ușor „simulate" din componente discrete și utilizate în diverse aplicații.

Fotodarlingtonul este un fototranzistor cuplat cu un tranzistor obișnuit în montaj Darlington (fig. 86a). Ambele

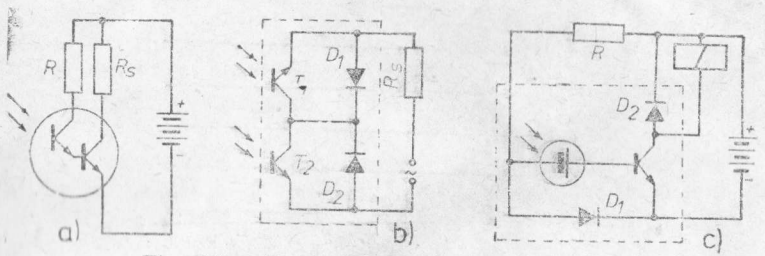



Fig. 86 — Structura unor dispozitive complexe cu fototranzistor: a) Fotodarlington; b) BPX 78 (Siemens); c) BPX 28 (AEG Telefunken).

componente sînt asamblate împreună într-o capsulă cu două terminale. Acest dispozitiv simplifică montajul, amplificarea produsă fiind foarte mare. Dezavantajul fotodarlingtonului constă în valorile mari ale timpilor de comutație.

Ansamblul din figura 86b este numit *fototranzistor pentru tensiune alternativă* (Siemens, BPX 78). De fapt este vorba de două fototranzistoare și două diode într-o aceeași capsulă cu trei terminale. El poate fi alimentat cu tensiune alternativă, ceea ce este util în unele circuite electronice. În timpul oricărei alternanțe unul din cele două fototranzistoare este șuntat de dioda care conduce, iar celălalt este polarizat corect și prin el trece un curent proporțional cu iluminarea. În schema din figura 86b, borna de ieșire se află practic la potențialul masei atunci cînd cele două fototranzistoare



sînt iluminate puternic, iar la întuneric pe această bornă regăsim tensiunea alternativă de alimentare.

Un montaj care simulează de fapt un fototranzistor este produs de AEG Telefunken sub denumirea BPX 28 și cuprinde o celulă fotovoltaică, un tranzistor și două diode într-o capsulă cu patru terminale (fig. 86c). Dioda $D_1$ este polarizată direct, prin ea stabilindu-se un curent de aproximativ 1 mA. Ea are rolul de a menține baza la un potențial puțin mai ridicat decît al emitorului, fără a produce însă deschiderea joncțiunii emitor-bază. Un mic surplus de tensiune generată de celula fotovoltaică produce deschiderea tranzistorului. S-a folosit acest artificiu pentru a se produce deblocarea tranzistorului la nivele scăzute de iluminare. Dioda $D_2$ servește pentru protecția la supratensiunile generate de înfășurarea unui releu ce se montează în colector.

## FOTOTIRISTORUL

Tiristorul este un dispozitiv semiconductor ce funcționează ca o diodă comandată, permițînd trecerea curentului între anod și catod într-un singur sens. Particularitatea sa constă în existența unui electrod suplimentar (numit „poartă") — tiristorul începe să conducă numai atunci cînd pe acest electrod se aplică o tensiune de comandă. Odată intrat tiristorul în conducție, semnalul de comandă nu mai este necesar și circulația curentului prin dispozitiv se menține atît timp cît intensitatea lui nu scade sub o anumită valoare minimă (de automenținere). Esențial este faptul că prin aplicarea unui impuls de tensiune și curent redus pe poartă se comandă, la momentul dorit, deschiderea tiristorului prin care trece un curent mare (eventual la o tensiune ridicată).

Atunci cînd comandarea se face prin intermediul unui impuls luminos direcționat spre una din joncțiuni, tiristorul devine un *fototiristor*. La fel ca tiristorul, el este alcătuit din patru tipuri de regiuni semiconductoare ce formează trei joncțiuni (fig. 87a). Terminalele sale corespund anodului ($A$), catodului ($K$) și porții ($G$). Amorsarea dispozitivului poate fi

făcută și prin aplicarea unei tensiuni pozitive pe poartă, ca la tiristor (fig. 87c).

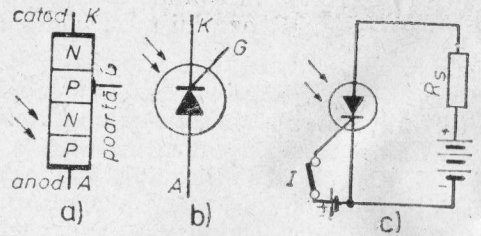



Fig. 87 — a) Structură de fototiristor; b) Simbolul fototiristorului; c) Amorsarea unui fototiristor.

Funcționarea unui fototiristor poate fi simulată prin cuplarea unui tranzistor $PNP$ ($T_1$) și a unui fototranzistor $NPN$ ($T_2$), montați ca în schema din figura 88 a. Pentru înțelegerea calitativă a fenomenelor ce intervin în funcționarea fototiristorului să urmărim pe schema din figura 88b modul în care funcționează acest „simulator".

Atunci cînd se aplică o tensiune directă între bornele $A$ și $K$, fără semnal pe $G$, prin circuit trece un curent foarte scăzut (rezidual). Este suficient ca $T_2$ să intre puțin în conducție pentru a începe un proces de avalanșă a curenților prin cei doi tranzistori. Această creștere se datorează modu-

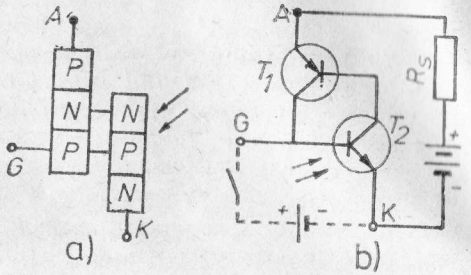



Fig. 88 — a) Ansamblu pentru simularea fototiristorului; b) Montaj pentru explicarea funcționării fototiristorului.



lui în care sînt conectate tranzistoarele în această schemă (reacție pozitivă). Intrarea în conducție a fototranzistorului $T_2$ se produce atunci cînd baza lui recepționează un semnal luminos.

Prin urmare, fototiristorul (ca și tiristorul) comută brusc din starea de blocare în cea de conducție; după comutare valoarea tensiunii dintre anod și catod este foarte mică, în timp ce curentul prin dispozitiv este mare, limitat numai de rezistorul de sarcină. Această comportare se deduce imediat din caracteristica curent-tensiune a fototiristorului dată în figura 89; aici trecerea bruscă în conducție este repre-

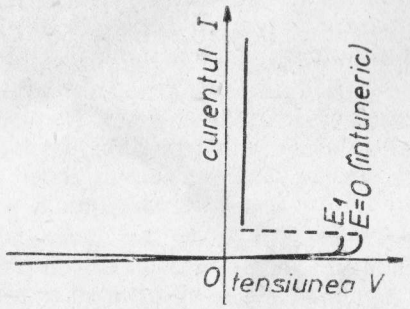



Fig. 89 — Caracteristică curent-tensiune a unui fototiristor.

zentată printr-o linie întreruptă. Se vede că această comutare poate avea loc și în absența luminii (sau a semnalului electric pe poartă) dacă tensiunea dintre anod și catod depășește o anumită valoare limită (valoare de străpungere). În practică se lucrează evident cu tensiuni anodice mai mici decît cea corespunzătoare străpungerii.

Odată amorsată conducția, semnalul luminos de comandă poate să dispară, prin dispozitiv continuînd să circule curentul. Pentru a readuce fototiristorul în stare de blocare, curentul din dispozitiv trebuie micșorat sub valoarea prag de automenținere. Aceasta se poate face prin întreruperea tensiunii de alimentare.

Există fototiristoare prevăzute și cu terminal pentru regiunea *N* alăturată anodului (baza tranzistorului *PNP* din fig. 88a). Se creează în acest fel o posibilitate suplimentară de amorsare a dispozitivului, printr-o tensiune negativă în raport cu anodul, aplicată pe acest terminal suplimentar. De fapt, aceste fototiristoare sînt o variantă fotosensibilă a așa-numitelor *întrerupătoare cu siliciu comandate, SCS* (de la denumirea engleză Silicon Controlled Swich).

În afara utilizării în aplicații simple (de exemplu, la realizarea unor relee fotoelectrice), fototiristoarele sînt întrebuințate pentru comanda unor tiristoare sau triacuri de putere și tensiune mare. În aceste cazuri, fototiristorul este conectat în circuitul de poartă. Se poate realiza astfel o foarte bună separare galvanică între circuitul de comandă (prin intermediul luminii) și tensiunile înalte controlate.

## DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE SEMICONDUCTOARE EMISIVE

După cum s-a menționat deja, recombinarea purtătorilor de sarcină liberi în semiconductoare poate fi neradiativă sau radiativă, caracterul ei fiind determinat de structura benzilor energetice.

În materiale ca siliciul și germaniul cea mai mare probabilitate o are recombinarea neradiativă. Energia rezultată ca urmare a acestui tip de recombinare (ce apare în cazul polarizării directe a diodelor realizate cu siliciu sau germaniu) este preluată de rețeaua cristalină, ceea ce face ca temperatura acestor dispozitive să crească pe măsură ce curentul direct are o valoare mai mare.

Structura benzilor energetice ale unor compuși intermetalici (de exemplu, GaAs, InP, InAs) care manifestă proprietăți semiconductoare este de așa natură încît probabilitatea recombinării radiative este extrem de mare. Ca urmare a acestui fapt, o diodă realizată pe aceste materiale va emite lumină atunci cînd este direct polarizată. Se obțin astfel *diodele electroluminescente*. Pentru desemnarea acestui tip de dispozitive este folosită adesea prescurtarea *LED* provenită de la inițialele denumirii în limba engleză — *L*ight *E*mitting *D*iode, adică diodă emițătoare de lumină.

Folosind o tehnologie mai complicată putem face ca lumina emisă de o diodă electroluminescentă să fie foarte centrată în jurul unei anumite lungimi de undă (monocromatică), coerentă și foarte intensă. Cum acestea sînt caracteristicile luminii emise de către un laser, diodele respective poartă numele de *diode laser*.

## DIODA ELECTROLUMINESCENTĂ

Dioda care are proprietatea de a emite lumină atunci cînd este direct polarizată se numește *diodă electroluminescentă*. Frecvența luminii emise depinde de energia eliberată în procesul de recombinare. Dacă recombinarea se face direct între electronii din banda de conducție și golurile din banda de valență (fig. 90a), energia fotonilor emiși este egală

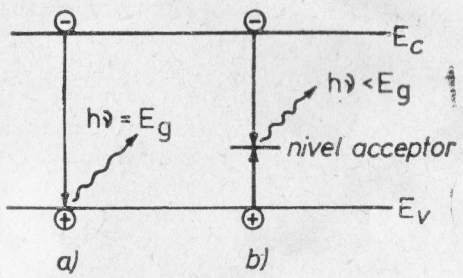



Fig. 90 — Reprezentare schematică a recombinării radiative în semiconductoare: a) recombinarea bandă-bandă; b) recombinare prin intermediul unui nivel acceptor.

cu lărgimea benzii interzise ($h\nu = E_g$), această situație întîlnindu-se în semiconductoare pure sau foarte slab impurificate. Atunci cînd în semiconductor există o cantitate mare de impurități, recombinarea prin intermediul nivelelor acestora devine mai probabilă (fig. 90b); în acest caz, energia fotonilor emiși este mai mică decît lărgimea benzii interzise ($h\nu < E_g$).

Prin urmare lungimea de undă a luminii emise datorită recombinărilor radiative va fi:

$$\lambda \geqslant \frac{hc}{E_g}, \qquad (62)$$

micșorarea lărgimii benzii interzise conducînd la creșterea valorii lungimii de undă.



Compusul GaAsP are proprietăți foarte interesante din acest punct de vedere. Lărgimea benzii sale interzise depinde de raportul dintre numărul atomilor de fosfor și cei din arsen și, ca urmare, prin controlarea proporțiilor în care aceștia sînt prezenți în material se pot realiza diode electroluminescente care să emită lumină de diverse culori. În mod obișnuit acest compus se notează $GaAs_{1-x}P_x$, unde

$$x = \frac{\text{numărul atomilor de fosfor}}{\text{numărul atomilor de fosfor} + \text{numărul atomilor de arsen}}$$

Creșterea proporției în care sînt prezenți atomii de fosfor mărește lărgimea benzii interzise a compusului, aceasta variind între 1,4 eV (la $x = 0$) și 2,1 eV (la $x = 1$).

Acest tip de material semiconductor poate fi utilizat atît la realizarea homojoncțiunilor (prin difuzie de impurități), cît și a heterojoncțiunilor.

Avînd în vedere că joncțiunile realizate pe GaAs emit radiații electromagnetice în domeniul infraroșu, introducerea atomilor de fosfor va deplasa maximul de emisie spre regiunea vizibilă a spectrului (tabelul 5).

| Materialul semiconductor | Lungimea de undă a luminii emise (nm) | Culoarea luminii emise | Lărgimea intervalului spectral (nm) | Merit vizual (lm/W electric) |
|---|---|---|---|---|
| GaAs | 920 | infraroșu | 30 | 0 |
| $GaAs_{0,6}P_{0,4}$ | 660 | roșu | 30 | 0,012 |
| $GaAs_{0,5}P_{0,5}$ | 610 | portocaliu | 30 | 0,200 |
| $GaAs_{0,15}P_{0,85}$ | 590 | galben | 25 | 0,200 |
| GaP | 560 | verde | 25 | 0,300 |

*TABELUL 5.* Cîteva caracteristici ale luminii emise de diodele electroluminescente realizate pe $GaAs_{1-x}P_x$

Emisia luminii în diodele electroluminescente polarizate direct se produce în regiunea de sarcină spațială și la distan-

țele $L_n$ și $L_p$ de ea, deoarece aici are loc recombinarea purtătorilor. Pentru a ieși din materialul semiconductor lumina va trebui să traverseze stratul difuzat (fig. 91), sufe-

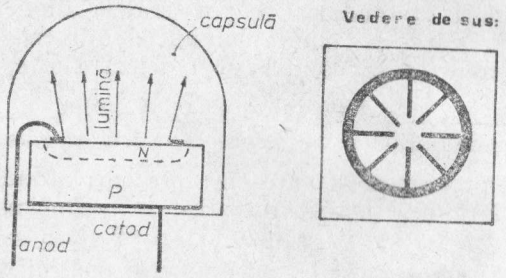



Fig. 91 — Reprezentare schematică a alcătuirii unui *LED*.

rind în acest fel o atenuare. Deoarece straturile de tip $P$ au un coeficient mare de absorbție, ele putînd scădea pînă la jumătate cantitatea de lumină produsă, se preferă realizarea unor joncțiuni pe material de tip $P$ în care se difuzează donori. În acest fel, în drumul ei spre suprafața liberă a structurii, lumina va traversa un strat de tip $N$ al cărui coeficient de absorbție este mai mic, atenuînd mai puțin lumina emisă.

Structura semiconductoare a unui *LED* are o suprafață foarte mică (sub un milimetru pătrat), deci ea este o sursă cvasipunctuală de lumină. Mărirea suprafeței luminoase se poate obține printr-o încapsulare adecvată, unul din rolurile capsulei fiind acela de a difuza lumina produsă de structură. Capsulele diodelor electroluminescente se realizează în mod obișnuit din materiale plastice transparente (atunci cînd se emite în infraroșu) sau translucide colorate (dacă se emite lumină vizibilă), culoarea materialului plastic fiind în acest caz aceeași cu a luminii emise. Formele lor geometrice și indicii de refracție ai materialului plastic se aleg astfel încît să se producă o atenuare cît mai mare a efectului luminii ambiante (de obicei albă). Se evită astfel strălucirea cap-



sulei datorită luminii exterioare cînd *LED*-ul nu emite, îmbunătățindu-se contrastul între stările „stins" și „aprins". De forma capsulei depinde și unghiul maxim față de axa capsulei din care poate fi văzută lumina emisă de diodele electroluminescente.

Domeniul spectral în care emit diodele electroluminescente este destul de îngust (fig. 92); lumina emisă nu este însă coerentă.

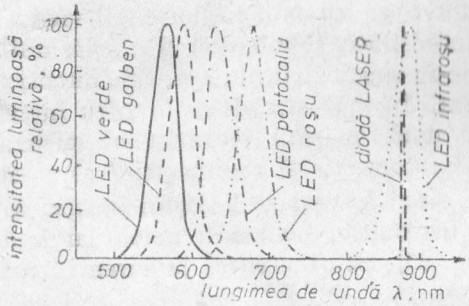



Fig. 92 — Spectre de emisie ale dispozitivelor electroluminescente.

Pentru diodele electroluminescente se poate defini o mărime, numită *merit vizual*, egală cu raportul dintre puterea luminoasă totală emisă și puterea electrică necesară pentru a o produce. Meritul vizual se măsoară în lm/W, el fiind o indicație a capacității ochiului uman de a percepe lumina emisă de aceste dispozitive. După cum se observă din tabelul 5, sensibilitatea ochiului crește spre regiunea verde a spectrului, în această regiune avînd valoarea maximă. Valoarea zero din domeniul infraroșu se datorează faptului că aceste radiații electromagnetice nu creează la om senzația de lumină.

Parametrii electrici ai diodelor electroluminescente sînt identici cu cei ai diodelor obișnuite:

— *Curentul direct maxim* ($I_{F\,max}$) — are valori de ordinul zecilor de miliamperi;

— *Tensiunea de „deschidere" a joncțiunii* ($V_F$) — variază de la 1,2 V pentru *LED*-urile ce emit în infraroșu pînă la 3 V pentru cele ce emit lumină verde;

— *Tensiunea inversă* ($V_R$) — poate avea valoarea maximă de cîțiva volți.

Parametrul ce definește calitatea unui *LED* este intensitatea radiației electromagnetice emise. În acest sens, diodele electroluminescente ce emit în domeniul vizibil sînt caracterizate de intensitatea luminoasă ($I_V$), măsurată în milicandele, iar cele cu emisie în infraroșu — de intensitatea radiantă ($I_e$), măsurată în mW/steradian. (Pentru înțelegerea sensului acestor două mărimi recomandăm citirea capitolului „Noțiuni de fotometrie și radiometrie" al acestei cărți).

Atît $I_V$, cît și $I_e$ variază liniar în funcție de curentul ce trece prin dispozitiv, pentru o gamă largă de valori ale acestuia (fig. 93). Se observă că la curenți mari dependența

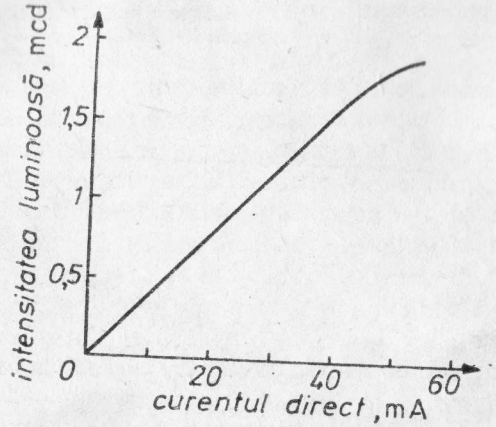



Fig. 93 — Dependența intensității luminoase a unui *LED* de curentul direct.



nu mai este liniară, aceasta datorîndu-se pe de o parte încălzirii dispozitivului, iar pe de altă parte unor efecte cuantice ce apar în cazul densităților mari de curent la joncțiune.

Ultimii parametri asupra cărora ne vom opri sînt timpii de răspuns. Ca și în cazul dispozitivelor a căror funcționare se bazează pe absorbția luminii, la diodele electroluminescente se definesc doi timpi de răspuns: timpul de creștere ($t_r$) și timpul de scădere ($t_f$). Ei reprezintă intervalele temporale în care intensitatea luminoasă (sau radiantă) crește de la 10% la 90%, respectiv scade de la 90% la 10% din valoarea maximă atinsă atunci cînd diodei electroluminescente i se aplică un impuls dreptunghiular de curent. Valorile mici ale acestor timpi (de ordinul nanosecundelor în cazul emisiei în infraroșu permit obținerea unor semnale luminoase de frecvență foarte mare, imposibil de atins prin întreruperea cu mijloace mecanice a unui flux luminos emis continuu.

Caracteristica curent-tensiune pentru o diodă electroluminescentă este prezentată în figura 94. Deoarece lumina

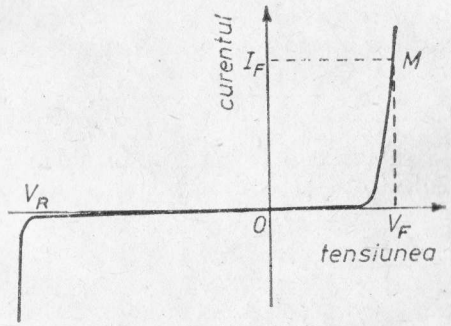



Fig. 94 — Caracteristică curent-tensiune pentru un *LED*.

se emite atunci cînd dispozitivul este direct polarizat, punctul de funcționare $M$ se alege pe porțiunea din cadranul întîi. Curentul $I_F$ ce corespunde acestui punct este limitat de o

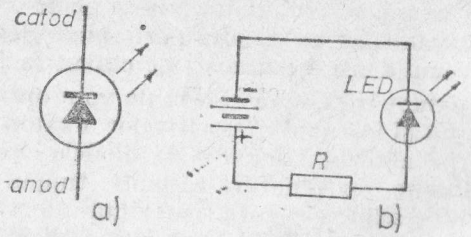



Fig. 95 — a) Simbolul *LED*-ului în circuitele electronice; b) Montarea *LED*-ului într-un circuit.

rezistență electrică $R$ legată în serie cu *LED*-ul (fig. 95 b). Valoarea acestei rezistențe se determină în funcție de curentul ce dorim să treacă prin circuit:

$$R = \frac{V - V_F}{I_F}, \tag{63}$$

$V$ fiind tensiunea de la bornele sursei de alimentare.

Dacă dioda electroluminescentă este plasată în circuitul de colector al unui tranzistor *NPN* (fig. 96), curentul direct va fi chiar curentul de colector iar rezistența de sarcină va avea valoarea

$$R = \frac{V^* - (V_F + V_{CE})}{I_F}, \tag{64}$$

unde $V^*$ este tensiunea de la bornele sursei, iar $V_{CE}$ — tensiunea dintre colectorul și emitorul tranzistorului.

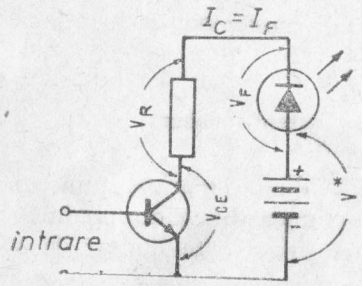



Fig. 96 — *LED* montat în circuitul unui tranzistor.



Curentul mic necesar „aprinderii" *LED*-urilor face ca acestea să fie preferate becurilor cu incandescență, iar tensiunea redusă necesară funcționării lor — becurilor cu descărcare în gaz inert. Diodele electroluminescente iau din ce în ce mai mult locul acestor becuri „clasice" pe panourile aparaturii de măsură și control.

Structurile semiconductoare emițătoare de lumină pot fi folosite pentru realizarea *afișoarelor optice*, acestea fiind dispozitive capabile să indice cifre sau litere atunci cînd sînt comandate electric.

Afișarea oricărei cifre între 0 și 9 se poate face prin intermediul configurației cu șapte segmente prezentată în figura 97. Fiecare segment este format dintr-un număr de diode

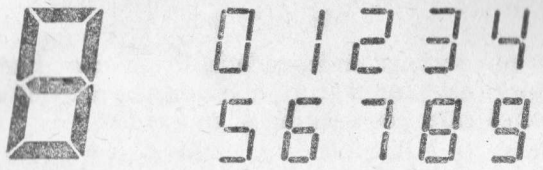



Fig. 97 — Configurație în formă de 8, cu șapte segmente electroluminescente și forma cifrelor afișate.

electroluminescente (între 1 și 6), în funcție de dimensiunea cifrei afișate. Toate structurile de pe un segment luminează simultan, aprinderea selectivă a anumitor segmente făcînd posibilă apariția cifrei dorite. Atunci cînd se folosește o singură structură electroluminescentă/segment, este necesară utilizarea unei capsule cu cavități alungite ce produc difuzia luminii emise pentru a omogeniza strălucirea segmentului. Alăturarea cîtorva asemenea dispozitive permite afișarea numerelor cu mai multe cifre.

O configurație asemănătoare celei din figura 97 poate fi obținută pe o singură structură semiconductoare cu dimensiunea de aproximativ 2—6 mm². Asemenea structuri se folosesc pentru realizarea afișajului la ceasurile de mînă sau la calculatoarele de buzunar. Pentru a nu produce oboseala ochiului în cazul unui timp de lucru mai îndelungat, un

ansamblu de lentile produce mărirea fiecărei cifre de aproximativ trei ori.

Atunci cînd este necesară și afișarea literelor se utilizează matrici de structuri electroluminescente, realizîndu-se așa-numitul *afișaj alfanumeric*. Într-o asemenea matrice ce conține 5 × 7 structuri dispuse ca în figura 98, fiecare punct

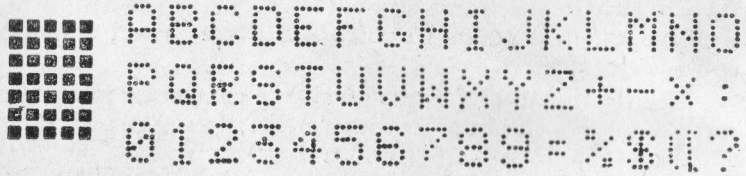



Fig. 98 — Afișajul alfanumeric cu matrice de 5 × 7 puncte.

luminos este acționat independent. Prin comandarea electrică corespunzătoare a unui grup de asemenea matrici vor apărea texte scrise care pot conține și numere.

## DIODA LASER

Printr-o tehnologie specială se pot realiza diode electroluminescente a căror lumină emisă să aibă caracteristicile luminii laser: monocromaticitate pronunțată, directivitate, coerență și o intensitate deosebit de mare. Acest tip de dispozitiv poartă numele de *diodă laser* sau *laser cu injecție*.

Pentru a avea o imagine clară asupra specificului diodelor laser, vom analiza întîi caracteristicile luminii emise de un laser „clasic" cu rubin, principiul ce stă la baza funcționării lui și elementele constructive esențiale ale acestuia.

Cuvîntul *laser* provine de la inițialele cuvintelor din limba engleză „*L*ight *A*mplification by *S*timulated *E*mission of *R*adiation", adică „amplificarea luminii prin emisia stimulată a radiației".

Electronilor dintr-un atom le corespund anumite nivele energetice, trecerea de pe un nivel pe altul făcîndu-se cu



absorbție sau cedare de energie, după cum nivelul energetic inițial ($E_i$) este inferior sau superior nivelului energetic final ($E_f$). Energia cuantei emise ($E_f = E_{sup} = E_s$) este determinată de intervalul energetic ce separă cele două nivele:

$$h\nu_{si} = E_s - E_i, \tag{65}$$

ceea ce face ca lungimea de undă ($\lambda_{fi}$) a radiației emise printr-o asemenea tranziție să fie:

$$\lambda_{si} = \frac{c}{\nu_{si}} = \frac{hc}{Es - Ei}. \tag{66}$$

În relația (66) $c$ este viteza luminii, iar $h$ — constanta lui Planck.

În orice sistem de atomi aflat în stare de echilibru la 0 K, electronii ocupă stările de energie minimă, emisia radiației electromagnetice prin asemenea procese neputînd avea loc. La o temperatură diferită de 0 K, electronii pot trece pe nivele energetice superioare datorită energiei termice, revenind apoi spontan la starea inițială. Cu cît temperatura este mai mare, electronii pot ajunge pe stări mai înalte și, prin urmare, revenirea la starea inițială va fi însoțită de emisia unor fotoni cu lungimea de undă mai mică. Acesta este mecanismul de emisie a luminii din corpurile încălzite și totodată explicația schimbării culorii acestora (deci a lungimii de undă a luminii emise de ele) odată cu creșterea temperaturii.

În cazul gazelor, aducerea electronilor pe stări energetice superioare se poate face prin altă metodă și anume prin intermediul unor cîmpuri electrice intense (în tuburile cu descărcare în gaze).

În cazul corpurilor incandescente, spectrul de emisie este foarte larg (din infraroșu pînă în ultraviolet), în timp ce lărgimea intervalului spectral în care emit tuburile cu descărcare este substanțial mai mic.

Dacă printr-un anumit procedeu vom face ca electronii de pe un anumit nivel inițial să ajungă pe *același* nivel final, revenirea la starea inițială va fi însoțită de emisia unor fotoni cu o frecvență bine determinată. Altfel spus, o asemenea sursă va emite lumină *monocromatică*. Cît de monocro-

matică poate fi această lumină? Sau, cu alte cuvinte, cît de mare ar trebui să fie intervalul spectral de emisie $\Delta\lambda$ pentru a defini o sursă ca fiind monocromatică? Sîntem tentați să răspundem că $\Delta\lambda$ ar trebui să fie zero, deoarece numai atunci lungimea de undă are o valoare bine determinată. Acest răspuns reprezintă doar un „punct de vedere teoretic" deoarece în realitate fiecare nivel energetic prezintă o anumită lărgime (fig. 99a). Datorită acestui fapt domeniul spectral al luminii emise va fi centrat în jurul unei lungimi de undă $\lambda_0$ (corespunzătoare tranzițiilor de pe $E_s$ pe $E_i$), prezentînd o *lărgime naturală* $\Delta\lambda$ (fig. 99b) a cărei valoare este determinată de structura particulară a nivelelor energetice ale substanței respective.

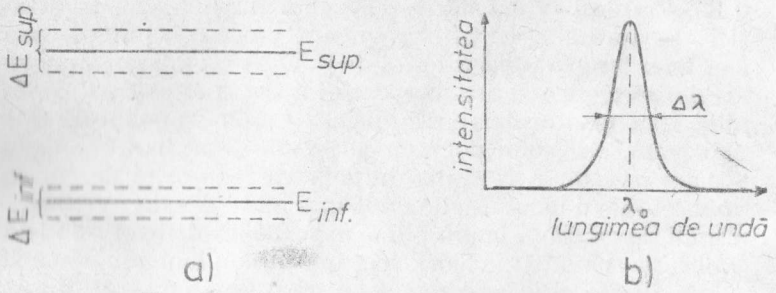



Fig. 99 — a) Lărgimea naturală a nivelelor energetice în atom; b) Lărgimea naturală a spectrului de emisie.

Intensitatea luminii emise în astfel de procese va depinde de numărul electronilor care efectuează simultan tranziții de pe nivelul superior pe cel inferior. Pentru ca emisia să poată continua este necesară *repopularea* nivelului $E_s$.

După cum vedem, funcționarea unei astfel de surse de lumină are loc în condiții *anormale*, ea necesitînd în permanență un număr mai mare de electroni pe nivelul energetic superior. Această situație poartă numele de *inversiune de populație*, iar realizarea ei implică aducerea continuă („pomparea") electronilor de pe nivelul $E_i$ pe $E_s$. Acest pompaj se



poate face electric, chimic sau prin intermediul luminii (fotonic).

Electronii pot ajunge de pe nivelul superior pe cel inferior fie *spontan* (pentru realizarea echilibrului), fie *stimulat* prin intermediul unei radiații electromagnetice cu aceeași frecvență ca a aceleia pe care sistemul o emite în mod spontan. Stimularea tranziției face ca timpul în care electronii ajung de pe $E_s$ pe $E_i$ să fie comparabil cu cel al „reîncărcării" prin pompaj a nivelului energetic superior (cîteva miimi de secundă). Aceasta face ca durata unui puls luminos emis să fie extrem de mică.

Emisia stimulată se poate face sub acțiunea fotonilor emiși în mod spontan. Pentru a înțelege cum se produce acest fenomen vom analiza funcționarea unui laser cu rubin.

Mediul activ al acestui laser este constituit dintr-o bară de trioxid de aluminiu ($Al_2O_3$ = rubin) în care există un procent mic (0,05%) de atomi de crom care substituie unii atomi din rețeaua cristalină a rubinului. Emisia luminii are loc pe seama tranzițiilor ce se petrec în atomii de crom (fig. 100).

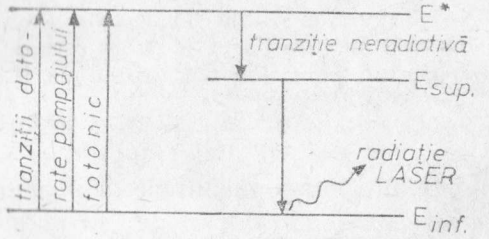



Fig. 100 — Schema tranzițiilor între nivelele energetice ale cromului implicate în emisia luminii laser.

Prin pompaj fotonic electronii de pe nivelul fundamental $E_i$ ajung pe un nivel excitat $E^*$. În atomul de crom există un nivel energetic $E_s$ (numit nivel metastabil) pe care electronii pot sta un timp mai îndelungat înainte de a efectua tranziții pe $E_i$. Trecerea atomului din starea $E^*$ în starea $E_s$ se face fără emisie de lumină, o asemenea tranziție numindu-se neradiativă.

Deoarece nivelul $E_s$ este mai populat decît $E_i$, tranzițiile spontane vor determina apariția unor fotoni cu energia $E_s - E_i$; direcția în care sînt emiși este arbitrară. Dacă unul din aceștia este emis pe direcția barei de rubin, el o va traversa reflectîndu-se succesiv pe oglinzile $O_1$ și $O_2$ (fig. 101). Întîlnind în drumul său atomi de crom, fotonul va stimula

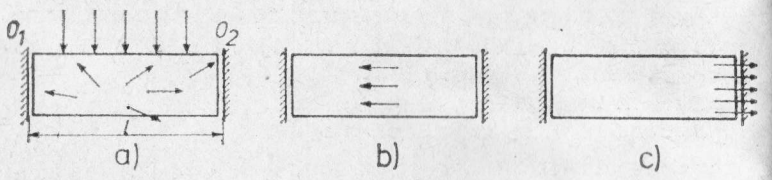



Fig. 101 — Reprezentare schematică a funcționării unui laser cu rubin.

emisia acestora. Fotonii rezultați vor stimula la rîndul lor efectuarea altor tranziții radiative, producîndu-se în acest fel mărirea intensității luminii, adică *amplificarea* ei.

Fenomenul de amplificare se produce într-un timp extrem de scurt. Ne putem da seama de aceasta făcînd un calcul simplu: dacă lungimea $l$ a barei de rubin este de 20 cm, timpul necesar luminii pentru a o străbate va fi:

$$t = \frac{l}{c} = \frac{0{,}2 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0{,}7 \cdot 10^{-9} \text{s},$$

adică șapte zecimi dintr-o miliardime de secundă.

Oglinda $O_2$ este semitransparentă, ea permițînd ieșirea luminii amplificate.

Remarcăm rolul esențial pe care sistemul celor două oglinzi îl are în producerea luminii laser. Ele formează *cavitatea rezonantă* a laserului, distanța dintre ele fiind esențială pentru amplificarea unei singure frecvențe, adică pentru obținerea monocromaticității în limitele lărgimii naturale a nivelelor.

După cum deducem din cele prezentate mai sus, pentru iemiterea luminii de tip laser o sursă trebuie să îndeplinească două condiții principale:

1. — să fie posibilă realizarea unei inversiuni de populație;



2. — să existe o cavitate rezonantă pentru amplificarea luminii.

Diodele electroluminescente în care se realizează aceste condiții poartă numele de *diode laser*. În cele ce urmează vom discuta numai despre diodele laser cu homojoncțiune, celelalte tipuri necesitînd și alte informații decît cele pe care spațiul acestei lucrări le poate oferi.

Diodele laser sînt joncțiuni $P-N$ realizate pe unul din materialele în care este posibilă apariția electroluminescenței (de exemplu, GaAs). Fiind vorba de semiconductoare în care există o bandă energetică interzisă, inversiunea de populație trebuie realizată între banda de conducție și banda de valență. Aceasta înseamnă ca, la orice moment de timp în cursul funcționării, raportul dintre numărul stărilor ocupate și al celor libere din apropierea limitei inferioare a benzii de conducție ($E_c$) să fie mai mare decît raportul corespunzător la limita superioară a benzii de valență ($E_v$). Este evident vorba de o stare de nechilibru, care trebuie realizată printr-un proces staționar. Ea poate fi obținută prin polarizarea directă a unei joncțiuni $P-N$ realizată pe GaAs (la valori mari ale curentului direct) dacă regiunea difuzată este foarte puternic impurificată. Domeniul $d$ în care apare inversia de populație se numește *regiune activă* (fig. 102) și este localizat în imediata vecinătate a joncțiunii. Lățimea regiunii active este extrem de mică, de ordinul 1—3 $\mu$m.

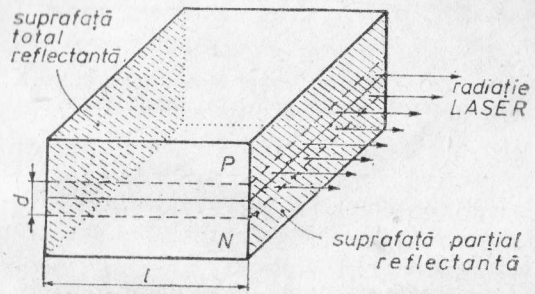



Fig. 102 — Structura unei diode laser.

Fotonii ce sînt emiși ca urmare a recombinării în regiunea activă, pe o direcție perpendiculară pe direcția de curgere a curentului (fig. 102), suferă reflexii multiple în cavitatea rezonantă. Realizarea pereților reflectători ai acestei cavități se poate face, de exemplu, prin lustruire mecanică sau chimică. Spre deosebire de laserul ce utilizează ca mediu activ rubinul, unde coeficientul de reflexie a luminii trebuie să aibă valori apropiate de unu, dioda laser necesită suprafețe reflectoare mai puțin pretențioase. Se constată că fluxul de fotoni devine aproape uniform distribuit în cavitatea rezonantă a diodei laser dacă coeficientul de reflexie este aproximativ 0,32. Bineînțeles că această constatare simplifică mult procesul tehnologic de realizare a suprafețelor reflectante.

Dacă analizăm dependența fluxului radiant al unei diode laser în funcție de curentul direct $I_F$ ce trece prin dispozitiv (fig. 103), constatăm că radiația electromagnetică emisă devine

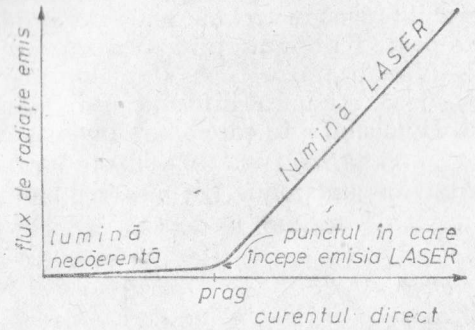



Fig. 103 — Dependența fluxului luminos de curentul direct pentru o diodă laser.

coerentă începînd de la o anumită valoare a acestui curent. Valoarea respectivă constituie *pragul* de la care injecția purtătorilor prin contactele diodei reușește să compenseze pierderile datorate absorbției în materialul semiconductor, procesul de oscilație în cavitatea rezonantă putînd să se autoîntrețină. Valoarea curentului de prag se mărește odată cu creșterea temperaturii. Acest efect se datorează faptului că



pe măsură ce temperatura este mai mare, absorbția în volumul semiconductorului devine mai puternică, iar valoarea indicelui de refracție se mărește, ceea ce face ca drumul optic ($nl$) al luminii între pereții cavității rezonante să fie mai lung.

Domeniul spectral în care emite o diodă laser este de aproximativ zece ori mai îngust decît al diodei electroluminescente realizată pe același material semiconductor, lărgimea lui fiind numai de cîțiva nanometri.

Lungimea de undă a luminii ce poate fi emisă de diodele laser depinde de materialul semiconductor care se folosește la realizarea lor. Dispozitivele de acest tip existente la ora actuală emit radiații electromagnetice în domeniul 610 nm ($GaAs_{1-x}P_x$) — 28 000 nm (PbSnTe), adică din regiunea roșie a spectrului vizibil pînă în infraroșul foarte îndepărtat.

În comparație cu laserii ce folosesc ca mediu activ un gaz sau un solid, diodele laser prezintă două mari avantaje:

— au dimensiuni foarte mici (suprafața structurii semiconductoare este de ordinul milimetrului pătrat) putînd furniza puteri relativ mari; la funcționarea în impulsuri puterea lor poate depăși 20 W;

— convertesc direct energia electrică în energie radiantă, randamentul conversiei fiind mai mare de 10%; în cazul celorlalte tipuri de laseri acest randament este de aproximativ 1%.

Divergența mare a fasciculului de lumină emis, precum și coerența mai scăzută reprezintă cele două dezavantaje ale diodelor laser.

Cel mai important domeniu de aplicație al diodelor laser îl reprezintă telecomunicațiile, cea mai recentă utilizare a lor fiind legată de transmiterea informațiilor prin fibre optice.

## CUPLORUL OPTIC

Cuplorul optic este un dispozitiv „hibrid" format dintr-un emițător și un receptor de lumină așezate față în față, la o distanță mică, în aceeași capsulă. În figura 104 se prezintă alcătuirea de principiu a unui cuplor optic realizat prin intro-

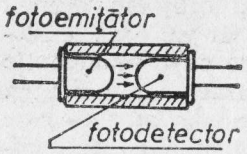



Fig. 104 — Alcătuirea de principiu a cuplorului optic.

ducerea unei diode electroluminescente și a unui fototranzistor într-un tub opac.

La intrarea cuplorului, adică la bornele emițătorului de lumină, se aplică un semnal electric. Lumina ajunge pe fotodetector, la bornele acestuia (ieșirea cuplorului) culegîndu-se tot un semnal electric. Așadar o comandă electrică este transmisă folosind ca intermediar lumina.

O proprietate a cuplorului o constituie izolarea foarte bună din punct de vedere electric a circuitului de intrare față de cel de ieșire. Dealtfel, denumirile care se mai folosesc pentru acest dispozitiv, și anume „optoizolator" sau „izolator cuplat optic" sînt sugestive în acest sens.

Caracteristic cuplorului optic este faptul că informațiile se transmit prin el *strict* într-un singur sens, de la emițător la detector, fără să existe o influență a ieșirii asupra intrării.

Se observă că aceste calități funcționale sînt similare celor ale releelor electromagnetice. Ceea ce aduc în plus cuploarele — viteză mare de comutație, lipsă de zgomot și piese în mișcare, insensibilitate la vibrații, șocuri și umezeală, durată extrem de mare de funcționare, greutate și dimensiuni reduse — le conferă însă un loc aparte în familia dispozitivelor electronice.

Există o diversitate foarte mare de cuploare optice. Teoretic se poate folosi orice fel de dispozitiv fotoemisiv (bec cu incandescență sau cu descărcare, diode electroluminescente) și orice tip de fotodetector (celulă fotovoltaică, fotorezistor, celulă fotoelectrică, fotodiodă, fototranzistor, fototiristor), cu condiția ca spectrul de emisie să corespundă într-o oarecare măsură cu sensibilitatea spectrală a detectorului de lumină (fig. 105). Va fi evident lipsită de sens utilizarea unui detector cu răspuns numai în domeniul vizibil atunci cînd sursa emite în infraroșu.



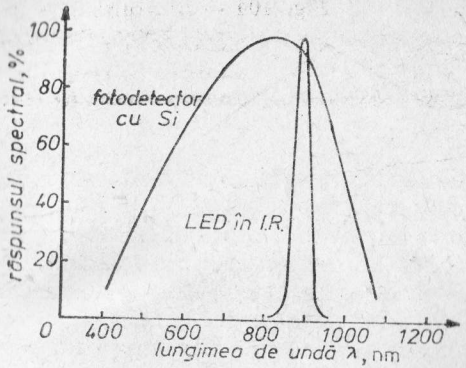



Fig. 105 — Suprapunere a domeniilor spectrale pentru un *LED* cu emisie în infraroșu și un fototranzistor cu siliciu.

Fiecare combinație compatibilă are avantajele și dezavantajele ei. Practic se folosesc pe scară largă diodele electroluminescente cu emisie în infraroșu (ca emițători) cuplate optic cu fototranzistoare, fototiristoare și fotodiode cu siliciu (fig. 106).

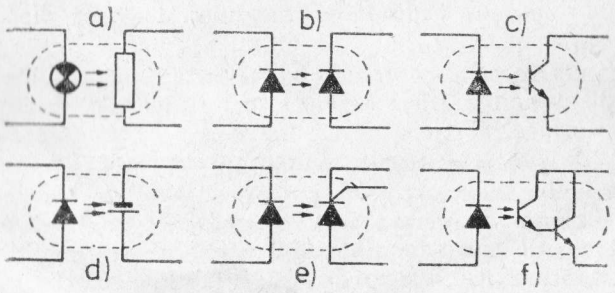



Fig. 106 — Structuri posibile pentru cuploarele optice: a) bec cu incandescență — fotorezistor; b) *LED* — fotodiodă; c) *LED* — fototranzistor; d) *LED* — celulă fotovoltaică; e) *LED* — fototiristor; f) *LED* — fotodarlington.

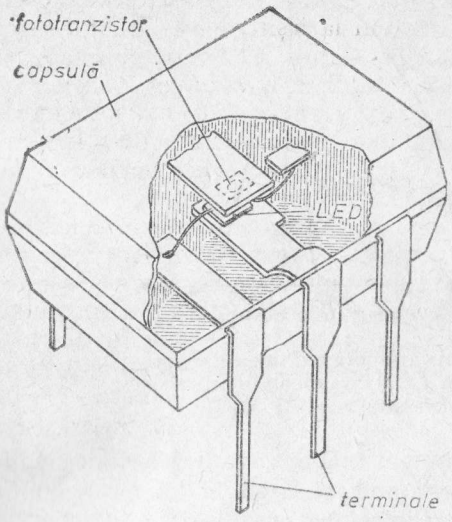



Fig. 107 — Secțiune printr-un cuplor optic cu *LED* și fototranzistor.

Figura 107 înfățișază alcătuirea unui cuplor optic. Emițătorul (dioda electroluminescentă) și receptorul (fototranzistor) sînt înglobate într-un material transparent, distanța dintre ele fiind de ordinul milimetrului. Capsula dispozitivului este opacă.

Parametrii prin care se caracterizează un cuplor sînt destul de numeroși. Dispozitivul fotoemițător și cel fotodetector au, fiecare în parte, caracteristicile lui specifice asupra cărora nu vom mai insista. Vom prezenta doar parametrii ansamblului.

1 — *Tensiunea de lucru* este tensiunea care poate să existe între emițător și detector fără pericolul străpungerii dielectricului. Are valori de ordinul kilovolților.

2 — *Rezistența de izolație* între intrare și ieșire este de ordinul sutelor sau miilor de megohmi.

3 — *Capacitatea de cuplaj* între circuitul emițătorului și al detectorului are valori de ordinul picofarazilor. Doar o valoare necorespunzătoare a acestui parametru poate produce o reacție între ieșire și intrare.



4 — *Factorul de transfer* (sau *cîștigul în curent*) este raportul dintre variația curentului la ieșire și variația corespunzătoare a curentului la intrare. El exprimă eficacitatea transferului semnalului electric prin cuplor. Valorile sale sînt subunitare, cu excepția cazurilor cînd fotodetectorul este un fototranzistor sau un fotodarlington. În aceste cazuri, cîștigul poate fi supraunitar, cu valori de ordinul zecilor sau sutelor.

Caracteristica de transfer (curentul de ieșire funcție de curentul de intrare) este practic liniară în cazul cuploarelor alcătuite din diode electroluminescente și celule fotovoltaice, fotodiode sau fototranzistoare. Pentru alte combinații emițător-detector aspectul ei se poate deduce ușor, de la caz la caz, luînd în considerare modurile de variație a intensității luminii emițătorului în funcție de curentul de intrare și respectiv a curentului de ieșire în funcție de iluminarea detectorului.

Aplicațiile cuploarelor optice sînt numeroase. Se folosesc cu precădere în calculatoare și instalații de automatizare pentru transmiterea informației către unul sau mai mulți receptori, evitîndu-se astfel interacțiuni nedorite. Separarea galvanică a circuitelor telefonice între care se transmite unilateral un semnal este posibilă cu ajutorul cuploarelor (transformatoarele obișnuite fiind „reversibile").

Modularea curentului continuu de valoare mică, în scopul transformării în curent pulsant ce poate fi ușor amplificat, se poate face prin folosirea cuploarelor cu fotorezistor.

Se fabrică dispozitive asemănătoare cuplorului, care au însă un spațiu liber (fantă) de cîțiva milimetri între emițătorul și receptorul de lumină. Pe aici poate trece un obiect opac mic a cărui prezență este astfel detectată.

Există așa-numitele relee „solid state", dispozitive cu patru terminale, ce au funcții identice cu ale releelor obișnuite. La intrarea lor se aplică tensiuni și curenți mici (de exemplu, 5 V/20 mA), iar ieșirea se conectează în serie cu rețeaua de curent alternativ și cu „sarcina". În circuitul de ieșire curentul poate fi de zeci de amperi. Aceste dispozitive conțin un cuplor optic, un trigger integrat (eventual cu un etaj de amplificare) precum și un triac de putere.

# NOȚIUNI DE FOTOMETRIE ȘI RADIOMETRIE

Descrierea funcționării dispozitivelor optoelectronice face apel la o serie de mărimi și unități de măsură ce caracterizează lumina emisă sau primită de acestea. Abundența și diversitatea unităților de măsură ale mărimilor ce caracterizează lumina, prezente în cărți și cataloage, pare dezarmantă la prima vedere, fiind generatoare de erori și confuzii.

Există două categorii distincte de măsurători ce se efectuează asupra luminii — fotometrice și radiometrice. Ele sînt fundamental distincte și nu se poate trece de la o unitate de măsură radiometrică la una fotometrică (sau invers) decît printr-o considerare atentă a definițiilor lor.

## FOTOMETRIE

Fotometria se ocupă de măsurători asupra mărimilor ce caracterizează lumina. Valorile mărimilor fotometrice sînt legate de răspunsul (sensibilitatea) ochiului uman la radiații electromagnetice cu diverse lungimi de undă. Sensibilitatea spectrală a ochiului nu este uniformă, ci are aspectul curbei din figura 108. Aceasta este așa-numita curbă vizuală $V(\lambda)$ standardizată. Se observă că maximul sensibilității ochiului uman este în regiunea verde a spectrului (la aproximativ 550 nm), radiațiile cu lungimea de undă sub 380 nm și peste 760 nm nemaiproducînd senzația de lumină.

Mărimile ce caracterizează lumina din punct de vedere fotometric sînt următoarele:



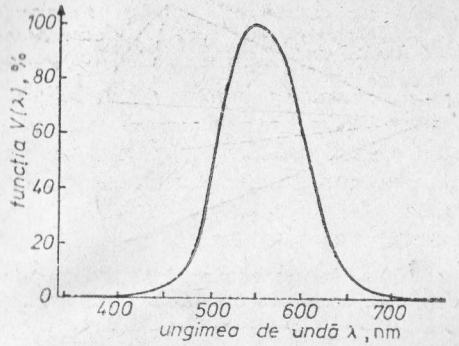



Fig. 108 — Curba vizuală standardizată.

1. *Fluxul luminos* ($\Phi_v$) reprezintă puterea luminoasă totală emisă de o sursă. El evaluează capacitatea ochiului omenesc de a percepe un flux energetic. Unitatea de măsură în sistemul internațional este lumenul (lm).

2. *Iluminarea* ($E_v$) reprezintă densitatea fluxului luminos la o anumită distanță față de sursa de lumină. Această mărime caracterizează suprafețele iluminate, fiind egală cu raportul dintre fluxul luminos și valoarea ariei suprafeței iluminate. În sistemul internațional (SI) unitatea de măsură pentru iluminare este luxul (lx): 1 lx = 1 lm/1 m².

   În afara luxului, alte două unități, neconforme cu SI, sînt utilizate în diverse cărți și cataloage străine pentru măsurarea iluminării — footcandle (fc) și phot (ph). Ele se definesc astfel:

   1 fc = 1 lm/1 ft² = 10,76 lx; unde 1 ft = 12 inch = = 30,48 cm

   1 ph = 1 lm/1 cm² = 10 000 lx.

3. *Intensitatea luminoasă* ($I_v$) este raportul dintre fluxul luminos emis de o sursă și unghiul solid de emisie al acestei surse. Unitatea de măsură este candela (cd): 1 cd = 1 lm/1 steradian. O reprezentare intuitivă a

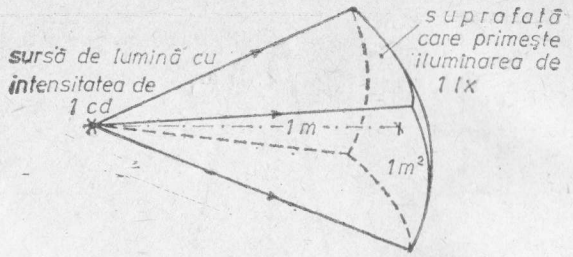



Fig. 109 — Reprezentare intuitivă a dependenței dintre intensitatea luminoasă și iluminare.

interdependenței dintre intensitatea luminoasă și iluminare este prezentată în figura 109.

4. *Emitanța luminoasă* ($M_v$) este raportul dintre fluxul luminos emis de o sursă în toate direcțiile și aria suprafeței acelei surse. În SI se măsoară în lm/m².
5. *Luminanța* ($L_v$) reprezintă raportul dintre intensitatea luminoasă a unei surse și aria sursei. Această mărime este întîlnită adesea și sub numele de „strălucire". Unitatea de măsură în SI este nitul (nt): 1 nt = cd/1 m². Indicăm încă patru unități de măsură ale luminanței, neconforme cu sistemul internațional, și valoarea lor în unități internaționale:
   1 stilb (sb) = 1 cd/1 cm² = 10 000 nt
   1 footlambert (ftL) = 1 cd/$\pi$ ft² = 3,43 nt
   1 lambert (L) = 1 cd/$\pi$ cm² = 3 183 nt
   1 apostilb (asb) = 1 cd/$\pi$m² = 0,318 nt

Primele două mărimi fotometrice definite ($\Phi_v$, $E_v$) depind de distanța față de sursa de lumină. Dat fiind faptul că orice sursă are o anumită extindere spațială, se pune problema de la ce punct al ei va trebui măsurată această distanță. În mod curent se evită această problemă, considerînd sursele de lumină ca fiind punctuale. Cînd putem considera însă o sursă ca fiind punctuală? De obicei la această întrebare se răspunde: „cînd distanța față de ea este suficient de mare". Tabelul 6 ne arată cît de mare trebuie să fie această distanță în cazul a trei tipuri de surse luminoase.



| | Sursă sferică (sferă de rază $a$) | Sursă plană (dreptunghi de dimensiuni $a$, $b$) | Sursă filiformă (cilindru de înălțime $a$ și diametru $b$) |
|---|---|---|---|
| Aria sursei | $4\pi a^2$ | $ab$ | $ab$ |
| Unghiul solid în care radiază sursa | $4\pi$ | $2\pi$ | $\pi^2$ |
| Distanța minimă față de sursă ($d$) pentru a obține efectiv o sursă punctuală | $10 \cdot 2a$ | $10\sqrt{a^2 + b^2}$ | $10\sqrt{a^2 + b^2}$ |
| Aria suprafeței care este iluminată la distanța $d$ | $4\pi d^2$ | $2\pi d^2$ | $\pi^2 d^2$ |

*TABELUL 6.* Mărimi caracteristice surselor de lumină.

## RADIOMETRIE

Mărimile radiometrice sînt independente de modul în care ochiul uman percepe lumina, unitățile radiometrice fiind deci la fel de adecvate spectrului vizibil, cît și radiațiilor ultraviolete sau infraroșii.

Vom putea aprecia dificultățile trecerii de la unitățile radiometrice la cele fotometrice (sau invers) dacă vom avea în vedere faptul că, de exemplu, în infraroșu mărimile radiometrice pot fi mult diferite de zero în timp ce mărimile fotometrice corespunzătoare sînt zero datorită absenței răspunsului ochiului uman în această regiune spectrală.

În cele ce urmează vom indica echivalentul radiometric al mărimilor fotometrice definite anterior. Toate unitățile de măsură ale mărimilor radiometrice sînt exprimate în unități ale sistemului internațional.

A. *Fluxul radiant* ($\Phi_e$) reprezintă puterea radiantă totală emisă de o sursă de lumină. Se măsoară în waţi (W).

B. *Iradianţa* ($E_e$) reprezintă densitatea fluxului radiant la o anumită distanţă faţă de sursă; valoarea ei este egală cu raportul dintre fluxul radiant şi aria suprafeţei receptoare. Unitatea sa de măsură este wattul pe metru pătrat ($W/m^2$).

C. *Intensitatea radiantă* ($I_e$) reprezintă fluxul radiant total al sursei, împărţit la unghiul solid în care acesta este distribuit; se măsoară în waţi pe steradian (W/sr).

D. *Emitanţa radiativă* ($M_e$) este fluxul radiant total împărţit la aria suprafeţei sursei. Se măsoară în waţi pe metru pătrat ($W/m^2$).

E. *Radianţa* ($L_e$) reprezintă raportul dintre intensitatea radiantă şi aria suprafeţei sursei; se măsoară în waţi pe metru pătrat ($W/m^2$).

În practică, pentru măsurarea intensităţii luminoase a surselor, a fluxurilor luminoase şi a iluminării suprafeţelor se folosesc aparate numite *fotometre*, iar pentru măsurarea intensităţii radiante, fluxului radiant şi a iradianţei se utilizează *radiometrele*. Aceste aparate sînt alcătuite dintr-un traductor ce converteşte semnalul luminos într-unul electric care este apoi amplificat şi măsurat.

Sensibilitatea spectrală a fotometrelor trebuie să fie cît mai apropiată de curba vizuală $V(\lambda)$, în timp ce sensibilitatea spectrală a radiometrelor trebuie să fie cît mai uniformă (plată), adică să aibă aceeaşi sensibilitate pe un domeniu cît mai larg de lungimi de undă. De cele mai multe ori obţinerea sensibilităţii spectrale dorite se face prin corectarea răspunsului spectral al traductorului cu ajutorul unor combinaţii adecvate de filtre optice plasate în faţa lui.

Cataloagele de componente optoelectronice cuprind curent valori ale unor mărimi fotometrice la care se măsoară anumiţi parametri ai dispozitivelor fotosensibile, precum şi valori ale luminanţei (strălucirii) dispozitivelor emisive.



Considerăm utilă indicarea valorilor iluminării unor suprafeţe cu surse de lumină cunoscute şi a valorilor luminanţei unor astfel de surse pentru ca cititorul să-şi poată face o idee despre mărimea unor asemenea cantităţi atunci cînd le întîlneşte în cărţi, cataloage sau prospecte (tabelul 7).

| | | |
|---|---|---|
| Valoarea iluminării (lx) | — produsă de Soare vara, cer senin, loc deschis | 100 000 |
| | — produsă de Soare, vara, cer acoperit, loc deschis | 1 000 |
| | — necesară pentru citit | 50—100 |
| | — produsă de Luna plină, cer senin | 0,025 |
| | — produsă de cerul senin, fără Lună, noaptea | 0,000 3 |
| Valoarea luminanţei (sb) | — Soarelui la zenit, vara, cer senin | 150 000 |
| | — unui bec de 60 W | 550 |
| | — unei suprafeţe albe la Soare, incidenţă normală | 3 |
| | — flăcării unei lumînări cu stearină | 0,4—0,8 |
| | — unui zid alb la Soare, la 45° | 0,3—0,5 |
| | — Lunii pline la zenit | 0,25 |
| | — unui zid alb pe Lună plină, la 45° | 0,000 009 |
| | — cerului noaptea, fără Lună | 0,000 000 01 |

*TABELUL 7.* Valori ale iluminării şi luminanţei cîtorva surse de lumină cu care sîntem familiarizaţi.

# APLICAȚII ALE DISPOZITIVELOR OPTOELECTRONICE SEMICONDUCTOARE

## PROBLEME GENERALE

Dispozitivele optoelectronice, ale căror principii de funcționare și mod de construcție a fost descris în capitolele precedente, sînt utilizate astăzi într-o multitudine de domenii ale tehnicii. Pentru a ilustra diversitatea aplicațiilor dăm în continuare o serie de exemple semnificative.

A. *Aplicații ale dispozitivelor fotosensibile*

1. Aprinderea automată a unor lumini la lăsarea întunericului și stingerea lor automată ziua.
2. Detectoare de incendiu care sesizează lumina focului.
3. Supravegherea flăcării la arzătoare.
4. Detectarea prezenței metalului incandescent în utilajele din industria metalurgică (la benzile de transport, laminoare etc.).
5. Declanșarea sincronă a unor lămpi fulger fotografice datorită fluxului luminos al altei lămpi.
6. Detectarea scînteilor excesive la colectorul electromotoarelor de putere, pentru evitarea deteriorării.
7. Telecomanda unor dispozitive prin fascicul luminos.
8. Întreruperea automată a funcționării unor mașini-unelte cînd operatorul a intrat într-o zonă unde este pericol de accidentare.
9. Limitarea cursei la mașinile-unelte cu mișcare rectilinie.
10. Sesizarea ruperii firului (textil sau metalic) ori a benzii (metalice, magnetice, de film) și oprirea instalației respective.



11. Sesizarea mărimii buclei de amortizare a unor benzi (magnetice, de film, perforate pentru calculator) fără contact mecanic.
12. Numărarea unor obiecte în mișcare.
13. Măsurarea nivelului lichidelor în rezervoare.
14. Citirea benzilor sau cartelelor perforate de calculator.
15. Sesizarea momentului echilibrării unui cîntar în instalațiile automate de dozare.
16. Pornirea și oprirea cronometrului electronic sau declanșarea aparatului fotografic la sosire în unele competiții sportive.
17. Măsurarea vitezei unor obiecte (vehicule) prin determinarea timpului scurs între momentele trecerii prin două „bariere de lumină".
18. Sesizarea automată a suprapunerii unor piese, datorită coincidenței unor orificii prin care trece lumina.
19. Determinarea poziției unui obiect (prin umbrirea unui fotodetector).
20. Măsurarea iluminării și eventual reglarea automată a expunerii în fotografie, cinematografie, televiziune.
21. Determinarea temperaturii de culoare a surselor de lumină.
22. Reglajul automat al strălucirii ecranului TV sau a iluminării tabloului de bord al unui vehicul, în funcție de lumina ambiantă.
23. Măsurarea transparenței sau reflectanței unor corpuri, pentru verificarea calității lor (hîrtie, coloranți, textile și altele).
24. Reglarea automată a curentului printr-un bec, în scopul obținerii unei iluminări constante în timp.
25. Măsurarea radiației solare în stațiile meteorologice.
26. Citirea pistei sonore optice a filmelor cinematografice.
27. Detectarea radiației din spectrul vizibil și infraroșul sau ultravioletul apropiat în spectrometrie, colorimetrie, cromatografie.
28. Captarea imaginilor de televiziune (camere TV).
29. Convertirea în vizibil a imaginilor din infraroșu.
30. Conversia energiei solare în energie electrică.

ß1. Copierea documentației scrise, desenate sau fotografiate pe hîrtie (xerox).
ß2. Cartarea automată a documentației prin citirea optică a unor coduri scrise pe ea.
ß3. Identificarea automată a vehiculului ce trece pe lîngă un post de control, datorită unei plăci cu oglinzi reflectoare așezate după un anumit cod, pe care o poartă vehiculul.
ß4. Măsurarea fără contact a turației unor piese aflate în rotație.
ß5. Transformarea unei deplasări liniare sau unghiulare în semnal electric, prin umbrirea treptată a unui fotodetector.
ß6. Măsurarea fără contact a temperaturilor mari, folosind radiația emisă de corp.

B. *Aplicații ale dispozitivelor fotoemisive*
1. Indicatoare luminoase cu *LED*-uri — pentru panouri de semnalizare, aparate etc.
2. Afișarea de cifre, litere și alte simboluri în aparatura electronică.
3. Surse de lumină monocromatică (dioda laser).
4. Stroboscoape și surse de lumină modulată, folosind *LED*-uri sau diode laser.

C. *Aplicații ale cuploarelor optice*
1. Transmiterea semnalului către unul sau mai mulți receptori, fără reacție și interacțiune între aceștia.
2. Izolarea electrică a circuitului de comandă față de circuitele comandate în instalațiile de automatizare.
3. Transmiterea informațiilor fără contact galvanic între sursă și receptor.

D. *Aplicații cu dispozitive fotoemisive și fotodetectoare*
1. Modularea și demodularea pe cale optică a unui semnal electric.
2. Telecomanda optică pe distanță relativ mică prin lumină modulată în amplitudine sau în frecvență.



3. Ghidarea automată pe trasee rectilinii a unor utilaje prin fascicul laser.
4. Transmisia de informații (binare, semnale de audiofrecvență) prin aer sau fibre optice.

Pentru a da constructorilor amatori posibilitatea experimentării și familiarizării cu componentele optoelectronice, vom prezenta în continuare o serie de 22 de montaje electronice care folosesc astfel de dispozitive în scopul realizării unor automatizări, măsurători de intensitate luminoasă, afișare a cifrelor etc. Parcurgînd lista acestora ne putem da seama că majoritatea montajelor descrise au aplicații în activități din viața de toate zilele. Aprinderea automată a luminii cînd se întunecă, telecomanda unui aparat de radio sau televizor, măsurarea expunerii la fotografiere sînt lucruri a căror utilitate este evidentă pentru oricine. Odată înțeleasă funcționarea unor asemenea circuite, cititorul își va putea da seama și de modul în care dispozitivele optoelectronice sînt utilizate în alte domenii de activitate, cum sînt cele enumerate mai sus. De altfel diferențele nu sînt foarte mari.

Două exemple: între circuitul prezentat în carte — care semnalează faptul banal că în cutia de scrisori a fost introdusă o hîrtie — și un cititor optic de cartele perforate pentru introducerea datelor într-un sistem de prelucrare a informațiilor nu este nici o diferență de principiu.

La fel, releul fotoelectric care ne amuză, făcînd să sune o sonerie la trecerea unei persoane prin spațiul cuprins între un bec și fotodetector poate fi foarte bine folosit la întreruperea automată a funcționării unei prese atunci cînd operatorul introduce mîna într-o zonă periculoasă.

Din acest motiv, depășind cadrul concret al aplicațiilor propuse, cititorului i se va deschide perspectiva unui domeniu de mare interes practic.

Principiul general de funcționare al montajelor cu dispozitive optoelectronice poate fi rezumat în cîteva fraze.

*Componentele fotosensibile* sesizează totdeauna valoarea iluminării pe care o primesc de la o sursă luminoasă. Modificarea acestei valori indică faptul că „s-a întîmplat ceva" și montajul reacționează într-un mod specific. Evenimentul

produs poate conduce la micșorarea fluxului luminos (de exemplu, interpunerea unui obiect opac în calea luminii sau scăderea însăși a fluxului luminos) ori creșterea lui. Specific fiecărei aplicații este felul în care se folosește această variație a iluminării pentru a obține informația dorită despre fenomenul care trebuie sesizat. Deci fiecare montaj va avea o anumită schemă optică și electrică pentru a realiza funcția propusă.

Pe de altă parte, caracteristica generală a tuturor *componentelor fotoemisive* este convertirea semnalului electric în lumină. Astfel, ochiul unui observator (sau alt fotodetector) primește pe cale optică o informație despre curentul electric care circulă prin dispozitiv. Caracteristic fiecărei aplicații rămîne modul în care se ajunge la acest semnal electric și semnificația pe care o are el.

În continuare vom face cîteva precizări generale privitoare la realizarea practică a montajelor care vor fi descrise. Înainte de a trece la construcția propriu-zisă, este necesară înțelegerea principiului de funcționare și a rolului diverselor componente din schemă.

După ce s-au montat piesele, se verifică încă o dată legăturile și de-abia după aceea se alimentează montajul și se face proba de funcționare. În cazul schemelor mai complexe este foarte utilă verificarea parțială a fiecărui etaj, imediat după realizarea lui. Se începe această operație de la etajul final, mergînd spre intrare. Un voltmetru este de mare utilitate în verificarea funcționării.

La multe montaje s-au dat și schema-bloc în scopul înțelegerii mai ușoare a funcțiilor pe care le îndeplinesc diferitele etaje, cît și a interconectării lor.

Ultima etapă a construcției o constituie reglarea aparatului, prin ajustarea valorilor unor componente și prin reglajul sistemului optic — dacă este cazul — pentru a obține o funcționare optimă.

Pentru cei mai puțin familiarizați cu limbajul specific electroniștilor facem o precizare utilă. Exprimarea frecvent întîlnită „în punctul *A* tensiunea are valoarea de *x* volți" înseamnă de fapt că tensiunea între punctul *A* și *masă* este



de *x* volți. Masa, chiar dacă nu este indicată pe schemă prin simbolul convențional, se va considera borna negativă a alimentării la toate montajele prezentate.

În schemele montajelor s-a adoptat, pentru economie de spațiu, scrierea prescurtată a valorilor rezistențelor și capacitoarelor. În tabelul 8 sînt date exemple pentru fiecare

| | Rezistoare | | | Capacitoare | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| VALOAREA | 1Ω | 1 kΩ | 1MΩ | 2 pF | 2 nF | 2/uF |
| NOTAȚIA PE SCHEMĂ | 1 | 1k | 1,0 | 2 | 2n | 2,0 |

*TABELUL 8.* Notația valorilor rezistoarelor și capacitoarelor.

din unitățile de măsură folosite. În toate cazurile se admit toleranțe de ± 20% de la valorile indicate, adesea chiar mai mult.

Diodele și tranzistoarele nu trebuie să fie neapărat de tipul menționat în schemă. În figura 110 se dau principalii parametri și echivalențele dispozitivelor semiconductoare folosite. În anexa de la sfîrșitul cărții sînt prezentate caracteristicile mai importante ale unor componente optoelectronice de fabricație românească.

Multe din construcțiile propuse au ca element final un releu. Pe scheme s-a indicat doar valoarea minimă a rezistenței bobinei. Vom subînțelege că este vorba de un releu electromagnetic de curent continuu, nepolarizat și avînd tensiunea de lucru egală cu tensiunea de alimentare a montajului respectiv. Releele cu rezistența mai mare sînt preferabile, fiind mai sensibile (au curentul de acționare mai redus). Trebuie să fim însă atenți și la contacte, ele trebuind să poată suporta tensiunea și curentul absorbit de sarcina ce o alimentăm prin releu. Sarcinile inductive (bobine, motoare,

**TRANZISTOARE**

| TIP | SUFIX | $V_{CE\ max}$ | $I_{C\ max}$ | condiții de măsură pentru β | | β | $P_{max}$ | ECHIVALENT | MATERIAL | CAPSULĂ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V | mA | $V_{CE}$ V | $I_C$ mA | | W | | | |
| AC 180 K | IV | 15 | 1500 | 1 | 600 | 30 - 60 | 0,75 | AC 180 cu radiator | Ge | punct C B E |
| | V | | | | | 50 - 100 | | | | |
| | VI | | | | | 75 - 150 | | | | |
| | VII | | | | | 125 - 250 | | | | |
| | VIII | | | | | 150 - 300 | | | | |
| AC 181 K | idem | 15 | 1000 | 1 | 600 | idem | 0,75 | AC 181 cu radiator | Ge | |
| BC 108 | A | 20 | 100 | 5 | 2 | 110 - 240 | 0,3 | BC 107, BC 171, BC 172, BC 173, BC 174, cu aceleași litere | Si | B C E sau B C E |
| | B | | | | | 200 - 480 | | | | |
| | C | | | | | 400 - 850 | | | | |
| BC 178 | IV | 25 | 100 | 5 | 2 | 65 - 150 | 0,3 | BC 177, BC 179, BC 307, BC 308, BC 309, cu aceleași sufix | Si | |
| | A | | | | | 110 - 240 | | | | |
| | B | | | | | 200 - 480 | | | | |
| | C | | | | | 400 - 850 | | | | |
| BD 135 | – | 45 | 500 | 2 | 150 | 40 - 250 | 6,5 | BD 137, BD 139 | Si | B C E |

**DIODE**

| TIP | $V_{inv}$ | $I_{max}$ | ECHIVALENT | MATERIAL | CAPSULĂ |
|---|---|---|---|---|---|
| | V | A | | | |
| 1N 4001 | 50 | 1 | 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007 | Siliciu | K inel A |
| 1N 4003 | 200 | 1 | 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007 | Siliciu | |

Fig. 110 — Parametrii principali și echivalențele dispozitivelor semiconductoare utilizate în montaje.

transformatoare), prin tensiunea de autoinducție ce apare la întreruperea circuitului, provoacă arc electric (scînteie) la contacte și din acest motiv acestea trebuie să fie supradimensionate.

Contactele de lucru ale releelor sînt reprezentate pe scheme doar atunci cînd ele închid un circuit figurat pe desen. În general aceste contacte se vor intercala în circuitele de alimentare ale sarcinilor (consumatorilor) ca în figura 111.




Fig. 111 — Legarea contactului unui releu în circuitul sarcinii.

Contactul $K$ al releului fiind normal deschis, sarcina primește curent doar atunci cînd releul este anclanșat. S-a preferat această situație pentru că, de regulă, timpul de acționare a sarcinii este mult mai redus decît timpul de nefuncționare; ca urmare și releul va fi alimentat o perioadă mai scurtă, deci consumul de energie electrică și solicitarea tranzistorului final vor fi mai reduse.

## MONTAJE PROPUSE

### REGLAJUL OPTOELECTRONIC AL VOLUMULUI SONOR

Necesitatea reglării de la distanță a volumului sonor se întîlnește frecvent la televizoare, combine muzicale, amplificatoare de putere sau la sonorizarea unor săli. Stînd la locul cel mai potrivit pentru vizionare sau audiție, este nevoie uneori să reglăm volumul sonor al amplificatorului aflat la o distanță ce poate fi cuprinsă între cîțiva metri și zeci de metri.

Simpla prelungire a celor trei fire de la potențiometru nu este recomandabilă (fig. 112a) deoarece în conductoare se va induce o tensiune alternativă de joasă frecvență de la instalația electrică sau alte surse de paraziți, producînd un zgomot supărător în difuzor (brum).

O soluție posibilă a problemei este reglarea optoelectronică de la distanță a volumului. Se montează în amplificator un divizor de tensiune ce cuprinde o fotorezistență. Un bec plasat în imediata ei vecinătate (fig. 112b) va determina,

Fig. 112 — a) Potențiometrul de volum existent în amplificator; b) Montura bec-fotorezistență utilizată în reglajul optoelectric.

prin lumina produsă, o anumită valoare a rezistenței ei (între cîțiva megohmi și sute de ohmi), deci un anumit raport de divizare a tensiunii de audiofrecvență. Reglînd de la distanță curentul prin bec, acționăm implicit asupra volumului sonor. Firul de telecomandă poate fi oricît de lung; el este parcurs de curent continuu de o valoare suficient de mare (zeci de miliamperi) și nu este sensibil la perturbații de felul celor amintite mai sus.

Figura 113 înfățișează schema propusă spre realizare. Un comutator cu 2 contacte X 2 poziții face trecerea de la reglajul manual (din amplificator) la cel telecomandat. Pe „manual" becul este stins, valoarea fotorezistenței *FR* este foarte mare (megohmi) și practic circuitul are aceeași structură ca în figura 112a. Pe poziția „telecomandă", tensiunea culeasă de cursor este aplicată la divizorul format din *FR* și rezistorul de 20 k Ω. În funcție de iluminare, pe punctul median al acestui divizor vom găsi o tensiune de audiofrec-



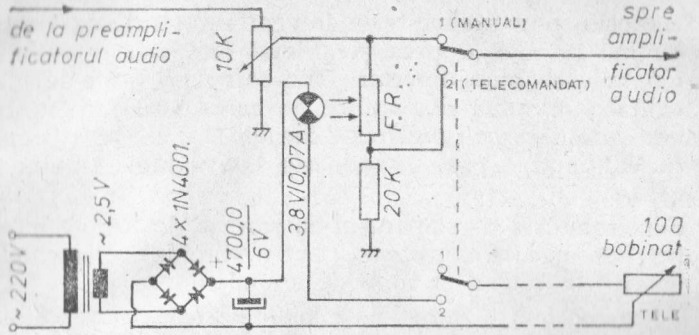



Fig. 113 — Schema circuitului de reglaj optoelectric al volumului.

vență cuprinsă între zero și valoarea reglată prin potențiometrul aparatului.

Reglajul iluminării se face modificînd curentul becului prin reostatul bobinat de 100 ohmi (tip radioficare). Alimentarea se face dintr-un redresor cu filtraj bun, încorporat eventual în aparatul telecomandat. Comutatorul asigură stingerea becului cînd se lucrează pe „manual".

Elementul esențial al montajului îl constituie ansamblul bec-fotorezistență. El reprezintă de fapt un cuplor optic în care circuitul de comandă este perfect izolat de circuitul comandat. Acest cuplor va fi confecționat prin închiderea becului și a fotorezistenței într-un tub opac de metal care asigură o bună disipare a căldurii produse de bec și protejează fotorezistența de lumina exterioară și cîmpurile electromagnetice. Practic se poate folosi orice tip de fotorezistență.

## EXPONOMETRU FOTOELECTRIC

Faptul că dispozitivele fotovoltaice produc o tensiune și un curent electric sub acțiunea luminii incidente pe suprafața lor fotosensibilă sugerează posibilitatea construirii unor aparate simple pentru măsurarea intensității luminii. O aseme-

nea necesitate se întîlnește la fotografiere, unde cantitatea de lumină pe care o primește filmul fotografic trebuie să aibă o valoare bine determinată pentru a obține imagini de calitate. Lumina disponibilă în momentul fotografierii trebuie dozată — prin reglarea diafragmei și alegerea timpului de expunere — pînă la valoarea convenabilă tipului de film folosit.

Exponometrul este aparatul cu care se determină intensitatea luminii la fotografiere, pentru stabilirea elementelor expunerii (diafragmă și timp de expunere).

O schemă foarte simplă ce folosește o celulă fotovoltaică ROL 11 sau ROL 011 este dată în figura 114. Celula gene-

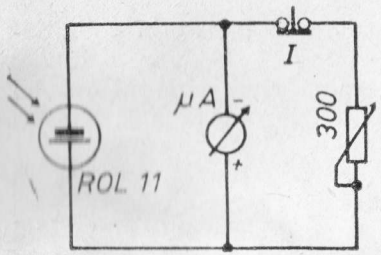



Fig. 114 — Schema de principiu a exponometrului.

rează un curent proporțional cu intensitatea luminii pe care o primește. Acest curent este măsurat cu un microampermetru. Este preferabil un instrument cît mai sensibil, de 50 sau chiar 25 μA, cu rezistența internă 1—5 kΩ și indicație logaritmică. Potențiometrul conectat în paralel pe instrument prin intermediul întreruptorului $I$ reprezintă un șunt care îi reduce sensibilitatea la 1 mA (cap de scală). Valoarea exactă a șuntului se stabilește în funcție de instrumentul disponibil, cu ajutorul formulei:

$$R_s = \frac{I_m R_i}{1\,000 - I_m}, \qquad (71)$$

unde $R_s$ este rezistența șuntului (ohmi), $R_i$ — rezistența internă a instrumentului (ohmi), iar $I_m$ — curentul maxim indicat de instrument la cap de scală (microamperi).



De exemplu, în cazul unui instrument de 50 μA și rezistența internă 4 kΩ, șuntul trebuie să aibă valoarea:

$$R_s = \frac{50 \times 4\,000}{1\,000 - 50} = 210{,}5 \text{ ohmi.}$$

Potențiometrul se va regla la această valoare calculată.

Astfel instrumentul dispune de două domenii de măsură. Primul, pentru iluminări puternice, cînd curentul măsurat este 1 mA la capătul scalei, se obține prin trecerea unei părți importante a curentului prin șunt ($I$ este închis). Al doilea domeniu se realizează prin apăsarea întreruptorului $I$; în circuit rămîne doar instrumentul, care măsoară curentul slab produs la iluminări mici (de exemplu, 50 μA cap de scală).

Măsurarea iluminării se face prin orientarea celulei spre obiectul fotografiat. Lumina reflectată de acesta face să devieze acul instrumentului pînă la o anumită diviziune. Dacă deviația este foarte mică, se apasă $I$ sensibilizînd astfel aparatul. Pentru a ști ce înseamnă această diviziune, exponometrul trebuie etalonat.

Etalonarea se face prin comparație cu un exponometru construit de fabrică. Pentru diverse iluminări se notează indicațiile celor două aparate și se stabilește o corespondență între ele. Etalonarea se va face atît pentru lumina de zi, cît și pentru cea artificială, deoarece sensibilitatea spectrală a celor două aparate nu este identică. Pentru lumina naturală se recomandă măsurarea din timp în timp a luminii solare reflectată de un perete alb expus spre sud-est, de la răsărit pînă la amiază, într-o zi senină. Se va parcurge astfel întreaga gamă de iluminări posibile. Etalonarea cu lumina surselor incandescente se face prin măsurarea luminii reflectate de un perete alb, iluminat cu un bec nitrafot de 500 W. Distanța de la zid la exponometru se menține fixă (circa 30 cm), iar distanța becului față de zid se modifică de la cîțiva metri pînă la 50 cm, pentru a obține diverse intensități luminoase.

Fără a fi obligatorie, este totuși utilă etalonarea aparatului în „indici de expunere".

S-a convenit să se denumească indice de expunere 0 (zero) corespondența din fig. 115a între valorile timpilor de expunere și ale diafragmelor. Cantitatea de lumină primită de un film este aceeași pentru orice pereche timp-diafragmă aleasă din acest tabel (de exemplu, 8 secunde — diafragmă 2,8 este echivalent cu 32 secunde — diafragmă 5,6). O deplasare cu o diviziune spre dreapta a șirului timpilor de expunere în raport cu șirul diafragmelor se notează cu 1. În figura 115b este dat ca exemplu indicele de expunere 7, obținut prin deplasarea cu 7 diviziuni spre dreapta a șirului timpilor. Timpul de 1 secundă corespunde acum diafragmei 11.

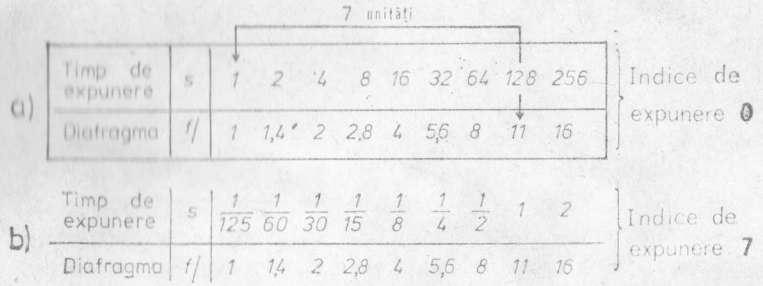



Fig. 115 — Semnificația indicilor de expunere.

Exponometrul nostru se poate etalona deci în indici de expunere, pentru o sensibilitate uzuală de film (18°DIN de pildă). Cînd vom obține indicația 7 știm că putem alege dintr-un tabel ca cel din fig. 115b orice pereche timp de expunere-diafragmă. Pentru alte sensibilități de film se ține cont că la fiecare creștere cu 3°DIN a sensibilității filmului trebuie adunată o unitate la indicele de expunere indicat de aparat, iar la o micșorare de 3°DIN — trebuie scăzută o unitate.



Dacă exponometrul este realizat cu un instrument sensibil, se pot aprecia indici de expunere cuprinși între 7 și 16 pentru lumină de zi și între 3 și 14 la lumina becurilor cu incandescență, ambele etalonări fiind pentru 18°DIN.

Practic, cele cîteva componente ale schemei se montează într-o cutie ale cărei dimensiuni sînt determinate de mărimea instrumentului folosit.

## TRADUCTOR UNGHIULAR

Se numește traductor unghiular sistemul care furnizează un semnal electric proporțional cu unghiul de deplasare a unei piese aflate în mișcare de rotație.

Vom descrie construcția unui traductor unghiular fotoelectric, caracterizat prin lipsa oricărui contact mecanic cu piesa care se rotește. Acest lucru este util mai ales cînd forța ce provoacă mișcarea este foarte mică și orice frecare ar constitui o perturbație inadmisibilă.

Un astfel de traductor este necesar, de exemplu, pentru a converti poziția acului indicator al unui aparat de măsură sensibil: mărimea neelectrică indicată de instrument (presiune, temperatură) va fi transformată astfel într-un semnal electric care poate fi transmis cu ușurință la distanță sau utilizat la diverse automatizări.

Radioamatorii pot folosi un asemenea traductor pentru indicarea poziției (orientării) unei antene directive de radiorecepție sau emisie pe unde ultrascurte, atunci cînd această antenă, acționată de un motor electric, nu este vizibilă din locul unde este instalat operatorul.

O altă aplicație o constituie măsurarea de la distanță a curenților de aer sau lichid: o paletă introdusă în curentul respectiv va fi rotită cu un unghi oarecare, proporțional cu debitul de fluid. Prin traductor, acest unghi este transformat în semnal electric care poate fi transmis prin fire și măsurat de la distanță. De exemplu, putem măsura, stînd în casă,

tăria rafalelor de vînt ce acționează o paletă instalată pe acoperiș (fig. 116).

Principiul traductorului unghiular cu reflexie pe care îl prezentăm este următorul: pe axul ce se rotește există un disc cu reflectanță variabilă; din fluxul luminos incident el

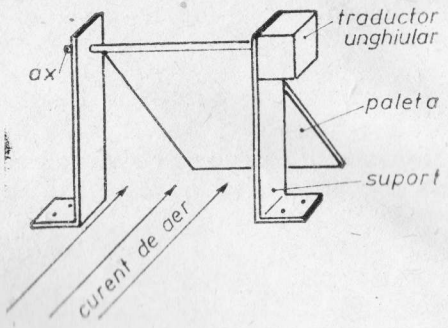



Fig. 116 — Montură pentru măsurarea curenților de aer.

reflectă o parte mai mare sau mai mică (în funcție de poziția lui) spre o celulă fotovoltaică. Curentul generat de acesta este proporțional cu iluminarea, deci cu unghiul de rotație al discului.

Figura 117 prezintă o secțiune prin construcția mecanică a traductorului. Axul al cărui unghi de rotație trebuie măsu-

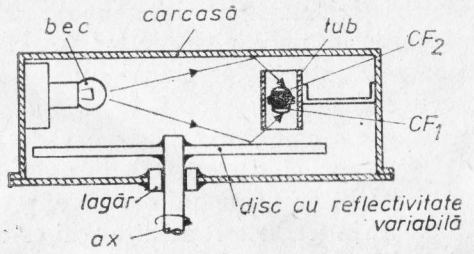



Fig. 117 — Construcția traductorului unghiular.



rat este solidar cu un disc din tablă subțire ce are pe fața superioară reflectanță variabilă. Un bec trimite lumina spre disc. Celula fotovoltaică $CF_1$ primește numai lumina reflectată de o mică porțiune a discului, anume cea care se găsește în fața suprafeței fotosensibile. O altă celulă $CF_2$ este iluminată prin reflexie pe carcasa dispozitivului, vopsită în negru; curentul generat de ea anulează efectul variațiilor intensității luminii emise de bec cînd i se modifică tensiunea de alimentare. Cele două celule sînt montate spate în spate și introduse într-un tub negru cu diametrul de 1 cm și lungimea de 2 cm, care împiedică accesul luminii laterale. Tot ansamblul este amplasat într-o carcasă de plastic opac sau tablă subțire pentru a nu fi influențat de lumina exterioară.

Un disc cu reflectanța variabilă pentru sesizarea rotațiilor de pînă la 180° are aspectul din figura 118. Pe o deschidere

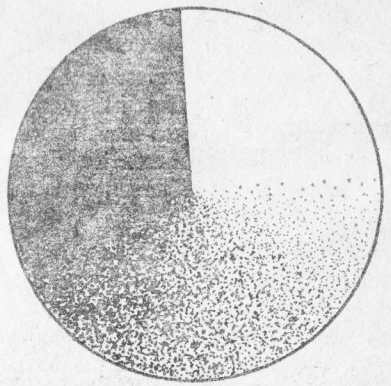


Fig. 118 — Disc cu reflectanță variabilă.

de 180° culoarea lui trece gradat de la albul cel mai strălucitor la negru intens. Astfel, în funcție de unghiul cu care se rotește, o zonă cu o anumită nuanță de gri va reflecta lumina becului spre celulă.

Să vedem acum montajul electric. El este extrem de simplu (fig. 119). Becul se alimentează de la o baterie de 4,5 V printr-un întreruptor tip sonerie. În acest fel becul se aprinde doar în timpul scurt cît se face „citirea" unghiului și astfel bateria va avea o durată mare de viață. Celulele fotovoltaice

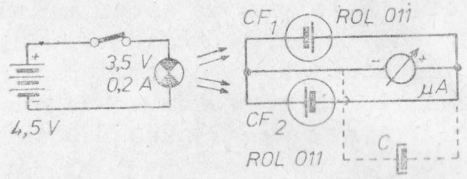



Fig. 119 — Schema electrică a traductorului.

debitează fotocurenți pe un același instrument de măsură, dar în sensuri opuse; microampermetrul va indica deci diferența lor. Cînd iluminarea celulelor este egală, curentul rezultant este zero, indiferent de valoarea iluminării.

Reglajul inițial constă în ajustarea poziției tubului cu celule, deplasîndu-l în sus și în jos pînă ce instrumentul indică zero atunci cînd zona cea mai neagră a discului este în fața lui $CF_1$, iar traductorul este închis în carcasă. După ce a fost realizată această condiție se poate trece la etalonarea traductorului.

Se rotește axul, deci discul, cu un anumit unghi (de pildă, 10°) astfel ca o zonă ceva mai deschisă la culoare să se afle în fața lui $CF_1$. Ea primește lumină mai multă și curentul său va predomina asupra celui debitat de $CF_2$. Acul instrumentului va indica o anumită valoare; vom nota 10° în acel loc al scalei. Se repetă rotația în același sens, din 10° în 10°, pînă la 180°.

Se recomandă ca instrumentul folosit să aibă 50 μA la capăt de scală și o rezistență internă mai mică de 5 kΩ. Un capacitor electrolitic (desenat punctat) poate fi eventual cuplat în paralel cu instrumentul. El va „tempera" mișcările prea rapide ale acului, dacă acest lucru este necesar. Dacă, de exemplu, montajul este utilizat pentru măsurarea



intensității vîntului, se amortizează oscilațiile și putem citi unghiul mediu de rotire a paletei. Valoarea capacității acestui capacitor va fi de 50—200 μF/3 V.

În încheiere, cîteva recomandări pentru confecționarea discului cu reflectanță variabilă.

El poate fi desenat cu tuș negru pe tabla care a fost vopsită în prealabil cu alb. Eventual se va extinde domeniul de măsură la 360°, mărind zona pe care se face trecerea de la alb la negru.

O altă metodă de realizare a discului constă în folosirea hîrtiei fotografice. Pe platanul unui picup (fig. 120) se așază

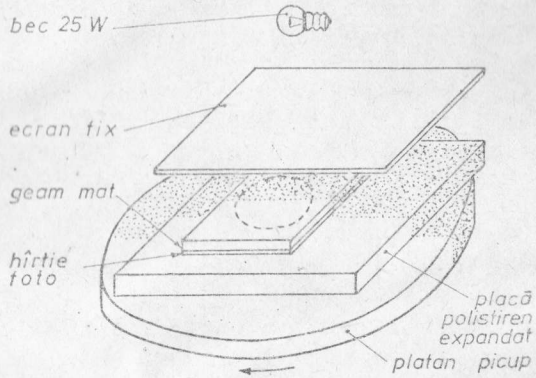



Fig. 120 — Metodă de confecționare a discului cu reflectanță variabilă.

o placă de polistiren expandat sau alt material ușor în care poate pătrunde axul platanului; realizăm astfel o suprafață plană. Pe centru se va așeza apoi o bucată de hîrtie fotografică neexpusă, de minimum 6 × 6 cm², cu emulsia în sus. Un geam mat menține planeitatea hîrtiei și elimină neuniformitățile de iluminare a ei. Un ecran opac, de carton sau tablă, va fi așezat deasupra încît să umbrească jumătate din suprafața platanului. Ecranul nu se rotește odată cu restul ansamblului, el rămînînd fix. Un bec de 25 W situat deasupra centrului de rotație va constitui sursa de lumină

pentru expunerea hîrtiei foto. Procedeul este următorul: după așezarea hîrtiei pe întuneric sau la lumina unei lămpi de laborator foto, se pornește picupul pe turația 33 și apoi se aprinde becul pentru o secundă. Va rezulta o expunere progresivă a diverselor sectoare circulare ale hîrtiei, care primesc lumină pe intervale variind între 0 și 1 secundă. După developarea obișnuită, obținem sectoare a căror nuanță trece de la alb la negru pe jumătate de hîrtie și de la negru la alb pe cealaltă jumătate. Timpul de expunere exact se va determina prin încercări. Vom decupa o jumătate de cerc (cu diametrul de 6 cm) și o vom lipi pe discul de tablă. Cealaltă jumătate se vopsește cu alb și negru pentru a obține aspectul din figura 118.

## ALIMENTATOARE SOLARE FOTOVOLTAICE

Conversia fotovoltaică a energiei luminii solare în energie electrică poate fi folosită de constructorul amator pentru alimentarea unor consumatori cu putere redusă. Descriem în continuare două astfel de montaje ce utilizează energia practic inepuizabilă a soarelui.

Cu două celule fotovoltaice se poate alimenta termometrul electronic a cărui schemă este dată în figura 121. Traductorul de temperatură este un termistor, a cărui rezistență

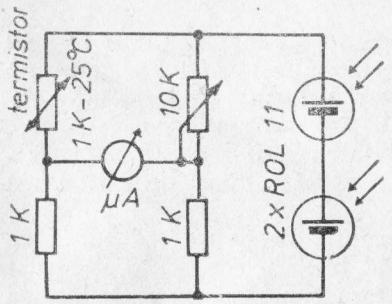



Fig. 121 — Termometru electronic alimentat cu celule fotovoltaice.



electrică variază invers proporțional cu temperatura mediului ambiant. El este conectat într-o punte de rezistoare, pe unul din brațe. Puntea se alimentează cu tensiunea generată de celulele fotovoltaice sub acțiunea luminii. Un microampermetru de 50 μA este montat pe diagonala punții și servește la echilibrarea ei. Din acest motiv el trebuie să aibă zeroul la mijlocul scalei. Butonul potențiometrului se mișcă în fața unei scale gradate, care permite citirea poziției cursorului.

Orice schimbare a temperaturii produce modificarea valorii rezistenței electrice a termistorului și, prin aceasta, dezechilibrarea punții. Instrumentul va indica un curent cu un sens oarecare, însă prin acționarea potențiometrului puntea se poate echilibra din nou, acul revenind la zero. Pe butonul gradat citim direct temperatura în grade Celsius.

Inițial se face etalonarea aparatului, notînd pe scală temperaturile indicate de un termometru cu mercur, după ce a fost făcută echilibrarea la temperatura respectivă.

Montajul fiind în punte nu este sensibil la modificările tensiunii de alimentare. De aceea, variațiile de iluminare din cursul zilei nu au influență asupra preciziei indicațiilor. Funcționarea poate fi asigurată chiar și la iluminarea produsă de un bec cu incandescență pentru iluminatul nocturn, dacă este situat la distanță mică (0,5 m).

În cazul cînd dispunem de mai multe celule solare, putem realiza un alimentator pentru aparatul de radio tranzistorizat (fig. 122).

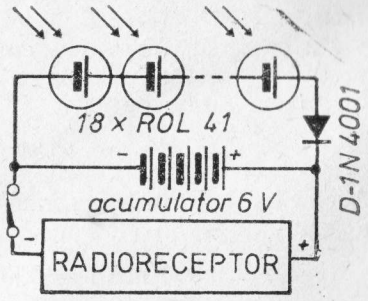



Fig. 122 — Alimentator solar și sistem de stocare a energiei.

S-a presupus că radioreceptorul se alimentează la 6 V (tip „Zefir", „Cosmos" etc.). Un număr de 18 celule solare conectate în serie generează o tensiune suficient de mare pentru a încărca un acumulator-tampon de 6 V. La bornele acestuia este legat radioreceptorul. Acumulatorul stochează energia electrică debitată de celule și o poate restitui în perioadele cu cer acoperit de nori sau noaptea.

Numărul celulelor a fost ales considerînd că fiecare din ele debitează 0,4 V pe o rezistență de sarcină optimă (în punctul de putere maximă), la iluminarea unei zile însorite. 18 celule vor debita 7,2 V, suficient pentru a încărca acumulatorul și a compensa căderea de tensiune de circa 0,6 V pe dioda *D*. Acest ultim element al circuitului are rolul de a permite circulația curentului numai de la celule spre acumulator, împiedicînd trecerea lui în sens invers. Astfel se preîntîmpină descărcarea acumulatorului prin celule atunci cînd tensiunea lor este mai mică (la lumină mai slabă ori noaptea).

Acumulatorul este alcătuit din trei elemente cu plumb sau din cinci elemente alcaline (fero-nichel sau cadmiu-nichel). Capacitatea nominală a lui trebuie să fie cuprinsă între 0,4 și 2 Ah. De exemplu, se pot utiliza elemente-disc, etanșe, tip DK-450 folosite la unele mașini electrice de bărbierit. Ele au 1,25 V/450 mAh pe element.

Utilizarea acestui sistem impune cunoașterea modului optim de exploatare. Să exemplificăm pentru un caz concret. Considerăm un aparat de radio „Cosmos" care consumă 70 mA la un nivel mediu de audiție sonoră, un set de 5 elemente DK-450 și 18 celule solare ROL 41 (sau două module ROL 45) ce debitează peste 100 mA într-o zi însorită de vară, la amiază. Presupunem că beneficiem 10 ore pe zi de un curent mediu de 80 mA obținut de la bateria solară; deci dispunem zilnic de

$$10 \text{ ore} \times 80 \text{ mA} = 800 \text{ mAh}.$$

Această valoare este suficientă pentru încărcarea integrală a acumulatorului (450 mAh), rămînînd disponibili încă:

$$800 \text{ mAh} - 450 \text{ mAh} = 350 \text{ mAh},$$



care permit funcționarea radioului ziua, simultan cu încărcarea acumulatorului, timp de:

$$350 \text{ mAh} : 70 \text{ mA} = 5 \text{ ore}.$$

Energia stocată în bateria de acumulatoare dă posibilitatea ca aparatul să mai „meargă" în absența soarelui încă:

$$450 \text{ mAh} : 70 \text{ mA} = 6{,}4 \text{ ore}.$$

Desigur, acest calcul este simplificat (s-a considerat, de exemplu, că randamentul acumulatorului este egal cu unu), dar suficient de precis pentru a ne face o idee despre modul în care se pune problema.

Este recomandabil ca celulele solare să fie reorientate de cel puțin 3—4 ori pe zi, cu suprafața fotosensibilă perpendiculară pe direcția razelor solare, în scopul captării unei cantități cît mai mare de energie.

## AFIȘOR NUMERIC

Diodele electroluminescente sînt folosite pe scară largă în construcția afișoarelor numerice. În figura 123a este înfățișat un astfel de afișor cu șapte segmente (notate *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*), cu care se pot afișa cifre de la 0 la 9. Fiecare segment conține un LED care necesită pentru alimentare circa 1,6 V la 20 mA.

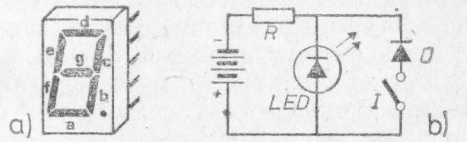



Fig. 123 — a) Notația segmentelor afișorului; b) Principiul de funcționare a decodorului cu stingerea *LED*-ului.

Construcția unui aparat de măsură numeric în care afișarea valorii măsurate să se facă cu astfel de componente optoelectronice este complexă și depășește posibilitățile unui

amator. Pentru familiarizarea cititorului cu principiul afișării numerice vom prezenta schema unui decodor simplu care afișează luminos starea unui comutator rotativ cu 10 poziții.

Sugerăm mai jos cîteva aplicații interesante ale acestuia.

Dacă axul comutatorului se cuplează cu axul rotactorului din televizor, se poate afișa numărul canalului TV pe care se face recepția, cifra afișată fiind vizibilă în orice moment, chiar pe întuneric. Plasat pe pivotul unei antene rotative pentru unde ultrascurte, antrenată de un motor electric, comutatorul transmite operatorului poziția antenei care va fi indicată printr-o cifră.

Se poate construi, ca amuzament, o minitabelă electronică de afișare a scorului la diversele jocuri desfășurate pe spațiul restrîns al unei mese.

Pentru a înțelege principiul de funcționare al decodorului, să urmărim circuitul simplu din fig. 123b. Un *LED* este alimentat în serie cu rezistorul *R* de limitare a curentului; el luminează atunci cînd *I* este deschis. Dacă se închide însă întreruptorul, o diodă obișnuită cu siliciu (*D*) este conectată în paralel cu dioda electroluminescentă. Ambele sînt polarizate direct, deci s-ar părea că un curent electric mare le străbate pe amîndouă. Dar, din cauza materialelor semiconductoare diferite din care sînt realizate, tensiunile de deschidere ale joncțiunilor au valori diferite: aproximativ 0,6 V la siliciu și 1,6 V la GaAsP. Ca urmare, cînd *I* este închis, tensiunea pe cele două diode este limitată la 0,6 V de către dioda *D*, valoare la care *LED*-ul nu se deschide; curentul prin el este foarte mic și deci nu luminează. Așadar, prin închiderea lui *I* se stinge *LED*-ul. Folosirea diodei *D* pentru „stingere" nu este neeconomică, cum pare la prima vedere, deoarece în schema completă astfel de diode redresoare sînt oricum necesare pentru a evita interconectarea circuitelor celor șapte segmente prin conductoarele de comandă.

Schema montajului este dată în figura 124. Atragem atenția că în schemă firele ce se intersectează în unghi drept nu au legătură electrică dacă nu există un cerculeț desenat la intersecția lor. Dealtfel, în electronică se folosește numai



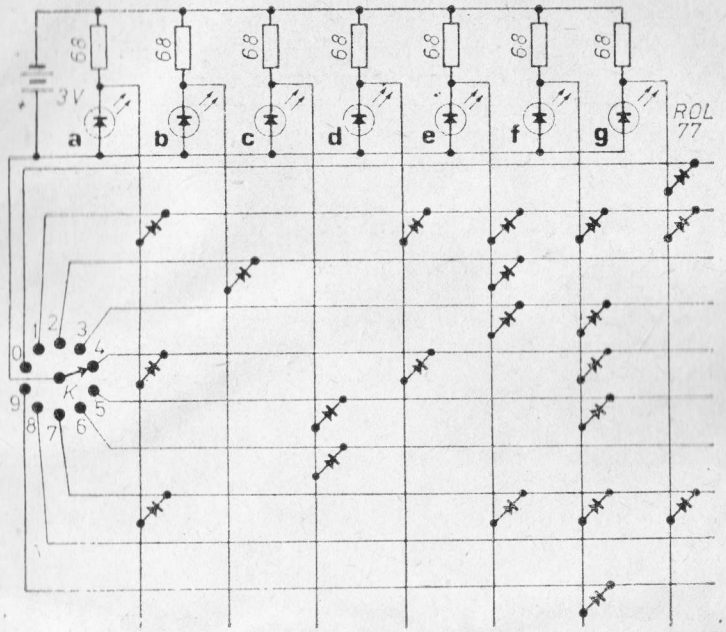



Fig. 124 — Schema montajului de afișare a cifrelor.

această convenție. „Ocolirile" de fire marcate în schemele din restul cărții au rolul de a evita greșelile de interpretare pe care le-ar putea face cei nefamiliarizați cu această convenție.

Observăm că *LED*-urile, cu anodul comun, sînt alimentate prin cîte un rezistor de limitare a curentului și emit lumină. Prin intermediul unor diode cu siliciu ele pot fi șuntate și stinse selectiv, în funcție de poziția comutatorului de comandă *K*. De exemplu, în poziția 0 el aplică plusul sursei pe dioda care stinge segmentul *g*; în poziția 1 plusul se aplică pe diodele care șuntează segmentele *a*, *d*, *e*, *f* și *g*; și așa mai departe. Fiecare poziție a comutatorului se traduce printr-o combinație de segmente aprinse care reprezintă o cifră.

Denumirea „decodor" dată circuitelor de acest fel provine din următorul fapt: la intrare se aplică un semnal în „cod zecimal" prin unul din conductoarele orizontale, iar la ieșire obținem semnal pe anumite conductoare verticale, conform altui cod, astfel încît să rezulte imaginea unei anumite cifre. Deci se face o schimbare a codului (convenției), o decodificare.

În schemă se va utiliza un element de afișare ROL 77 și diode redresoare 1 N 4 001 sau similare. În lipsa acestora din urmă se pot folosi joncțiuni valide din tranzistoarele defecte cu siliciu, ce pot suporta 20 mA.

În încheiere, o altă aplicație: afișarea numerică a indicațiilor unui ceas mecanic. Pe cadranul izolant al unui ceas de masă se amplasează o combinație potrivită de contacte sub forma unor arce de cerc (fig. 125) pe care circulă niște cursoare solidare cu limbile ceasului. Contactele pot fi confecționate prin tehnica circuitelor imprimate. Cursoarele sînt fire de sîrmă elastică lipite pe arătătoarele ceasului. Sînt necesare 6 decodoare și tot atîtea elemente de afișare: pentru minute,

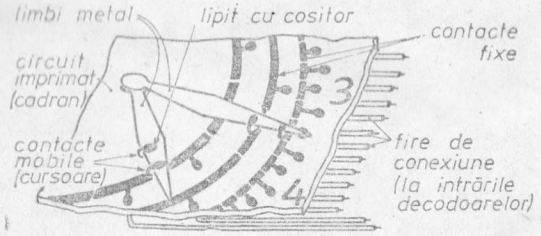



Fig. 125 — Cadran de ceas cu contacte electrice.

zeci de minute și ore. Cifra 1 de la zecile de ore se va afișa cu un bec simplu (3,8V/0,07 A) introdus într-o cutiuță neagră cu o decupare de forma cifrei 1. Fiecare contact se leagă la una din intrările decodorului corespunzător. De exemplu: contactele de 0 minute (oră fixă, 10, 20, 30, 40 și 50 minute) se conectează la intrarea 0 a decodorului de minute; contactele de la 1 minut (1, 11, 21, 31, 41, 51 minute) se leagă



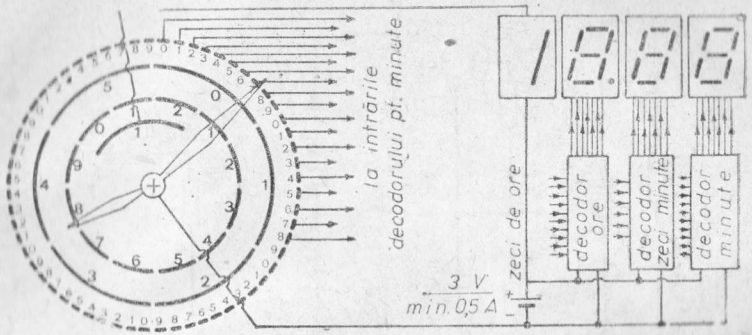



Fig. 126 — Schema afișării numerice a orei.

la intrarea 1 a aceluiași decodor ș.a.m.d. Schema completă este dată în figura 126.

## INDICATOARE OPTICE DE TENSIUNE

Diodele electroluminescente se utilizează ca elemente de semnalizare optică în multe situații deoarece, față de becurile cu incandescență, ele au cîteva avantaje remarcabile: consum mic de curent, dimensiuni mici, lipsă de inerție și fiabilitate ridicată.

Vom descrie cîteva scheme simple care indică prezența tensiunii continue prin aprinderea unor *LED*-uri. Ele absorb curent de comandă redus (sub 1 mA) și pot fi utilizate în diverse montaje electronice pentru semnalizarea optică a existenței și polarității unei tensiuni ce depășește o anumită valoare.

Un prim tip de indicator este prezentat în figura 127a. C'nd tensiunea care se aplică la intrare este zero sau mai mică de 0 6 V tranzistorul este blocat și *LED*-ul nu luminează. Dacă la intrare tensiunea crește peste 0,6 V, tranzistorul se deschide și curentul de colector face ca *LED*-ul să se „aprindă". Odată cu mărirea tensiunii de intrare crește curentul de bază și, corespunzător, cel de colector. Acesta din urmă este limi-

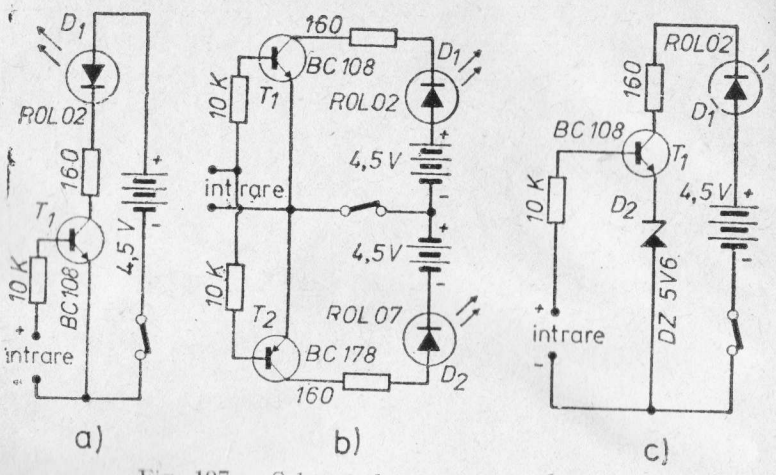



Fig. 127 — Scheme de principiu ale indicatoarelor de tensiune: a) pentru o singură polaritate, b) pentru ambele polarități, c) cu prag de tensiune.

tat, datorită rezistenței de colector, la circa 20 mA. În acest fel, luminozitatea *LED*-ului crește la început dar apoi atinge un nivel constant. Pentru a nu distruge tranzistorul, tensiunea aplicată la intrare nu trebuie să depășească 10 V. Polaritatea ei va fi cea indicată în figură.

În figura 127b este reprezentată o variantă a circuitului anterior, destinată indicării nu numai a prezenței ci și a polarității tensiunii. Este de fapt o dublare a montajului prezentat mai înainte, folosind încă un tranzistor, de tip *PNP*, care se va deschide la aplicarea unei tensiuni negative pe bază. Este preferabil ca cele două *LED*-uri să aibă culori diferite (de exemplu, roșu și galben) pentru a fi distinse cu ușurință.

O altă variantă a montajului (fig. 127 c) indică depășirea unui prag de tensiune superior valorii de 0,6 V. Pentru aceasta, emitorul tranzistorului este menținut la o anumită tensiune pozitivă. În figură, ea este de 5,6 V, obținută prin



înserierea cu o diodă Zener având această valoare. Ca urmare, tensiunea necesară la intrare pentru a „aprinde" *LED*-ul este:

$$5{,}6\ \text{V} + 0{,}6\ \text{V} = 6{,}2\ \text{V}.$$

Constructorul poate modifica circuitul pentru a obține o altă valoare a tensiunii de prag. Rezistorul de colector va fi calculat cu relația:

$$R_c(\text{ohmi}) = \frac{U_a - U_Z}{0{,}02},$$

unde $U_a$ este tensiunea de alimentare, iar $U_Z$ — tensiunea diodei Zener, ambele exprimate în volți.

Dacă este necesară o diodă Zener de tensiune mai mică (sub 5,6 V), mai greu de procurat, ea poate fi înlocuită cu un grup de diode cu siliciu (sau joncțiuni bune ale unor tranzistoare defecte) legate în serie și polarizate direct, deci cu catodul la minusul sursei. Pe fiecare diodă căderea de tensiune va fi circa 0,6 V, deci

$$U = n \cdot 0{,}6\ \text{V},$$

unde $n$ este numărul de diode înseriate.

Indiferent de varianta aleasă, după realizarea montajului este util să se verifice experimental tensiunea de intrare care provoacă „aprinderea" *LED*-ului, deoarece ea poate fi diferită de cea calculată (de exemplu, datorită formei cotului caracteristicii curent-tensiune a diodei Zener). Pentru această operație se crește treptat tensiunea aplicată la intrare și se urmărește pe un voltmetru valoarea atinsă în momentul cînd lumina *LED*-ului devine vizibilă.

Forma constructivă este la alegerea celui care realizează montajul. El poate fi încorporat unui aparat mai complex sau poate fi construit separat ca un tester, introdus într-o carcasă pe care se montează *LED*-ul și întreruptorul sursei.

Astfel de indicatoare sînt utile pentru semnalizarea depășirii valorii normale a tensiunii de la ieșirea unui redresor sau a unui amplificator de audiofecvență. Ele pot fi folosite

de fapt pentru a semnaliza depășirea unei valori prestabilite a oricărei mărimi variabile (chiar neelectrice), dacă se folosește un traductor și un amplificator de curent continuu adecvate.

## AUTOMAT PENTRU OPRIREA MAGNETOFONULUI

La magnetofon, deconectarea automată a motorului, atunci cînd s-a terminat banda, este utilă, deoarece evită uzarea inutilă a părții mecanice cînd aparatul este lăsat în funcțiune fără supraveghere. Metoda folosită de unele firme constructoare utilizează o porțiune metalizată de la capătul benzii: ea închide circuitul de alimentare al unui releu care deconectează motorul.

În lipsa unui astfel de dispozitiv, se poate realiza un montaj fotoelectric care sesizează prezența sau absența benzii prin atenuarea unui fascicul de lumină. Avantajele acestui sistem sînt: lipsa unui contact mecanic cu banda, posibilitatea funcționării și cu benzi fără metalizare la capete și oprirea motorului chiar și în cazul ruperii accidentale a benzii.

Principiul de funcționare poate fi înțeles urmărind figura 128. Pe carcasa magnetofonului se montează, într-un loc disponibil de pe traseul benzii, un bec și o fotodiodă. Printre aceste două elemente trece banda. Fluxul luminos primit de fotodiodă de la bec este intens atunci cînd banda este scoasă

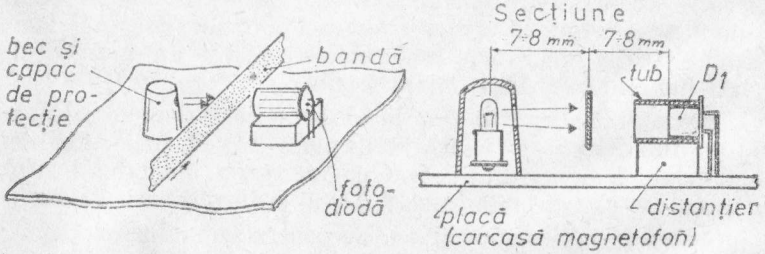



Fig. 128 — Dispunerea elementelor principale ale automatului.



și atenuat considerabil cînd ea este prezentă. Un montaj electronic diferențiază aceste două situații și oprește motorul atunci cînd banda lipsește. Schema montajului este dată în figura 129. Cînd există bandă în fața fotodiodei $D_1$, fluxul luminos incident pe suprafața sa fotosensibilă este mic. Ca urmare, curentul invers al fotodiodei este mic, iar tensiunea

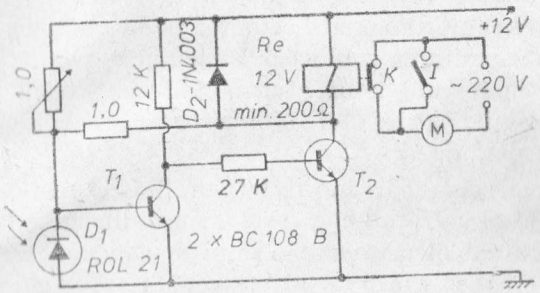



Fig. 129 — Schema automatului pentru magnetofon.

la bornele sale are o valoare considerabilă, suficientă pentru a deschide pe $T_1$. Acest tranzistor conduce, și tensiunea sa de colector este mică. Din acest motiv, $T_2$ nu conduce, nefiind deschis, iar releul nu este alimentat. Contactul său $K$, normal închis, asigură alimentarea motorului de la rețea.

Cînd banda s-a derulat total sau s-a rupt, spațiul dintre bec și fotodiodă rămîne liber. $D_1$ este iluminată puternic și tensiunea la bornele ei scade la o valoare mică, sub 0,6 V, deci insuficientă pentru a menține pe $T_1$ în conducție. El se blochează, tensiunea sa de colector crește și $T_2$ se deschide. Releul anclanșează și deschide contactul $K$, deci motorul se oprește.

O reacție pozitivă este realizată prin rezistorul de 1 MΩ conectat între ieșirea și intrarea amplificatorului. El face ca trecerea din conducție în blocare și invers să fie bruscă și releul să acționeze ferm. Modul de funcționare este următorul: o creștere mică a iluminării lui $D$ provoacă, după cum am văzut, o scădere a tensiunii pe colectorul lui $T_2$. Prin

rezistorul de reacție, această scădere este transmisă pe baza lui $T_1$. Ea are același efect ca și scăderea iluminării pe $D_1$ și produce în final o micșorare suplimentară a tensiunii pe colectorul lui $T_2$. Deci efectul oricărei variații a iluminării este amplificat și circuitul trece mai rapid dintr-o stare în alta.

Un întreruptor manual *I*, montat pe magnetofon, va permite scurtcircuitarea contactului releului *K* pentru a scoate din funcțiune automatul atunci cînd manevrăm frecvent benzile și acțiunea stopului automat la fiecare scoatere a rolei ne poate deranja.

Cîteva recomandări în privința realizării practice a montajului. Becul va fi protejat de o carcasă din material plastic opac, eventual confecționată dintr-un capac de stilou sau pix prin tăiere și găurire pentru a căpăta aspectul din figura 128. Se recomandă vopsirea exterioară în negru mat a carcasei pentru a nu reflecta lumina din cameră. Becul are 12 V/40 mA și poate fi procurat ca piesă de schimb pentru trenulețele electrice. În lipsa lui se poate folosi orice bec cu putere asemănătoare (0,5 W), dar tipul recomandat are avantajul unor dimensiuni reduse.

Fotodioda se montează într-un tub de protecție din plastic negru (de 1 cm lungime) care servește la mărirea directivității, împiedicînd lumina ambiantă să ajungă pe lentilă.

Restul montajului se introduce într-un loc disponibil în magnetofon și se alimentează de la acesta sau de la un redresor separat. Contactul releului trebuie să suporte curentul motorului; în caz contrar este necesar ca el să acționeze un al doilea releu, mai puternic.

Sensibilitatea montajului se reglează cu potențiometrul de 1 MΩ. În funcție de piesele folosite, ea se ajustează astfel încît releul să declanșeze ferm la introducerea unei benzi în calea fasciculului luminos și să anclanșeze la scoaterea ei.





Adesea, cutia de scrisori nu este situată în imediata vecinătate a apartamentului, ci la intrarea în bloc sau pe gardul curții. De aceea este necesară o deplasare specială pentru a afla dacă ziarul sau corespondența așteptată a sosit. Dacă există posibilitatea montării unor fire pe această distanță, se poate construi un semnalizator care să indice prezența unui obiect în cutie.

Desigur, cea mai simplă schemă de acest gen ar cuprinde un bec sau o sonerie de avertizare, închiderea circuitului fiind făcută de un contact electric acționat de obiectul în cauză. Deși simplă, această schemă nu este satisfăcătoare din cauza dificultății de a realiza un contact care să fie acționat de o mare diversitate de obiecte, de la cele foarte mici și ușoare (avize tipărite pe o foaie de hîrtie) pînă la cele mai mari și grele. În plus, contactul trebuie să reziste la eventualele intemperii la care poate fi supusă cutia în locul unde este montată.

O soluție elegantă a problemei o constituie un semnalizator fotoelectric. Obiectul introdus în cutie micșorează fluxul luminos pe care un detector de lumină montat pe unul din pereți îl primește de la o sursă amplasată pe peretele opus

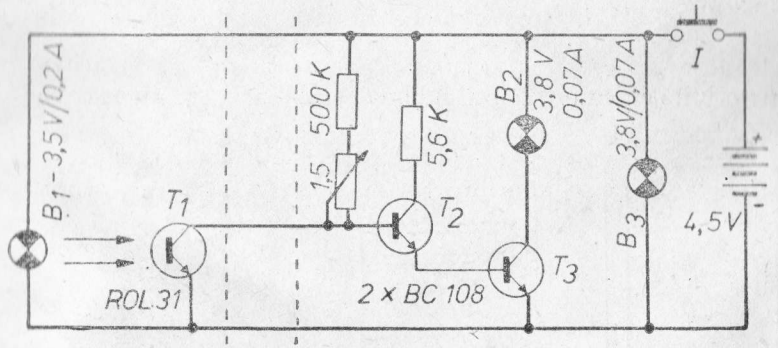



Fig. 130 — Schema semnalizatorului pentru corespondență.

al cutiei. Această atenuare este sesizată de un montaj electronic ce declanșează un bec de semnalizare.

Schema din figura 130 permite construirea unui montaj ce îndeplinește funcția descrisă mai sus. În cutie sînt montate becul $B_1$ și fototranzistorul $T_1$. Acesta din urmă este iluminat dacă nu există nici un obiect opac în drumul luminii produse de $B_1$. Deci $T_1$ este în conducție și tensiunea emitor-colector este mică, insuficientă pentru a deschide tranzistorul $T_2$ și implicit pe $T_3$. Ca urmare becul de avertizare $B_2$ este „stins".

Dacă în cutie se introduce un obiect, chiar și o simplă foaie de hîrtie, $T_1$ primește mai puțină lumină de la $B_1$ și se blochează. Tensiunea pe colectorul lui $T_1$ (și deci pe baza lui $T_2$) crește, iar $T_2$ se deschide. Ca urmare, se mărește curentul de bază al lui $T_3$ precum și curentul său de colector. Becul $B_2$ va lumina, semnalînd existența corespondenței.

Pentru a nu consuma tot timpul energie electrică, s-a prevăzut întreruptorul $I$ tip sonerie. Apăsînd pe el, montajul este alimentat și $B_2$ se „aprinde" sau nu, după cum în cutie există sau nu un obiect. Becul $B_3$ se aprinde în orice situație, indicînd faptul că există tensiune. Se poate folosi pentru alimentare o baterie de lanternă de 4,5 V, durata acesteia fiind foarte mare (circa 6 luni) deoarece schema nu consumă curent decît în timpul „testării" efectuate prin apăsarea lui $I$.

Figura 131 sugerează modul în care pot fi plasate becul și fototranzistorul în cutie. Ele sînt fixate pe doi pereți

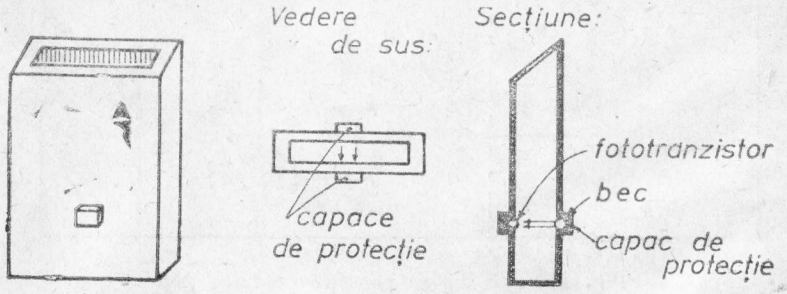



Fig. 131 — Detalii constructive.



opuși ai acesteia, la 5—6 cm distanță față de fundul cutiei. Două capace din tablă sau plastic negru protejează becul și fototranzistorul de intemperii și de lumina exterioară. Fototranzistorul trebuie să primească lumină doar de la $B_1$ pentru ca automatul să funcționeze corect. Legătura între cutie și apartament — unde se află restul montajului — se face cu trei fire de sîrmă tip sonerie. Becul $B_2$ de avertizare va fi vopsit în roșu pentru a-l deosebi ușor de $B_3$.

După terminarea construcției trebuie reglată sensibilitatea montajului, prin alegerea poziției cursorului potențiometrului. Cea mai mare sensibilitate se obține cînd cursorul este la capătul dinspre baza lui $T_2$. Trebuie verificat însă dacă o foaie de hîrtie albă, de grosime medie, introdusă în cutie este sesizată de circuit și $B_2$ se „aprinde". Hîrtia nu este perfect opacă și un montaj prea sensibil nu va detecta atenuarea fluxului luminos produsă de ea. În acest caz se va micșora sensibilitatea prin rotirea cursorului pînă cînd $B_2$ se „aprinde".

O ultimă remarcă: la epuizarea bateriei lumina lui $B_1$ devine insuficientă pentru a determina intrarea în conducție a lui $T_1$ și astfel $B_2$ luminează chiar dacă nu există corespondență în cutie. Este o alarmă falsă, dar utilă pentru că atrage atenția asupra necesității schimbării bateriei.

## LAMPĂ AUTOMATĂ DE POZIȚIE

Anumite locuri periculoase, obstacolele de pe drumurile publice, autovehiculele parcate pe zona carosabilă trebuie semnalizate în timpul nopții printr-o lumină, pentru a fi observate cu ușurință.

Aprinderea acestei lămpi de poziție la lăsarea serii și stingerea ei cînd se luminează de ziuă poate fi automatizată. Se elimină astfel necesitatea supravegherii lămpii de către o persoană și se economisește energia acumulatorului folosit pentru alimentarea becului.

Un montaj electronic care realizează această automatizare este prezentat în figura 132. Traductorul care sesizează nivelul luminii naturale este fototranzistorul $T_1$. Semnalul electric furnizat de el este amplificat de lanțul de tranzistoare $T_2$, $T_3$, $T_4$ și în final reglează curentul prin becul de semnalizare $B$. Să analizăm mai atent funcționarea montajului.

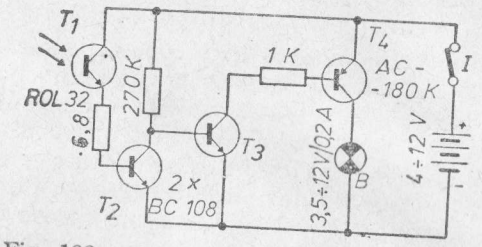



Fig. 132 — Schema lămpii automate de poziție.

În timpul zilei $T_1$ este iluminat și curentul prin el are o valoare mare, limitată de rezistorul cu care este înseriat. Acest curent este amplificat de $T_2$ care conduce. Tensiunea între emitorul și colectorul lui $T_2$ este mică (cîteva zecimi de volt), deci insuficientă pentru a deschide tranzistorul $T_3$ a cărui bază s-a conectat direct la colectorul lui $T_2$. În consecință $T_3$ nu conduce și nu asigură polarizarea bazei lui $T_4$, iar prin becul $B$ — care constituie rezistorul lui de colector — curentul este neglijabil și lampa nu luminează.

Cînd se înserează, lumina pe care o primește $T_1$ scade și prin fototranzistor curentul se micșorează mult. Tranzistorul $T_2$ începe să se blocheze, iar tensiunea sa de colector crește. Ajungînd la o valoare suficientă pentru a-l deschide pe $T_3$ (circa 0,6 V), ea produce intrarea în conducție a acestui tranzistor și curentul de bază al lui $T_4$ se mărește. Creșterea, multiplicată cu factorul de amplificare în curent continuu $\beta$, al lui $T_4$, apare și în circuitul de colector. Curentul prin $B$ crește și lampa se aprinde treptat. La întuneric total, becul $B$ primește practic toată tensiunea sursei de alimentare și luminează intens.



La ivirea zorilor fenomenul se repetă în sens invers. Crește iluminarea și curentul prin $T_1$; $T_2$ intră în conducție, iar $T_3$ și $T_4$ se blochează. Prin $B$ trece un curent din ce în ce mai slab, pînă la stingerea lui completă. Ziua consumul de curent din sursă este neglijabil.

Montajul funcționează la tensiuni de alimentare cuprinse între 4 și 12 V, acoperind astfel o gamă largă de utilizări. Becul trebuie să aibă tensiunea nominală egală cu a sursei de alimentare. Sensibilitatea montajului depinde de factorii de amplificare ai tranzistoarelor folosite. Pentru valori medii ale acestor factori, becul este acționat în intervalul de aproximativ 15—30 minute înainte de apusul și răsăritul soarelui, în zilele senine. Cînd cerul este înnorat sau este ceață, acest interval se modifică. Uneori aprinderea becului se face și ziua, pe furtună, cînd nivelul de iluminare scade foarte mult. În toate aceste cazuri lumina lămpii este de o utilitate evidentă.

Montajul va fi realizat cît mai compact și se va închide într-o cutie pentru a-l feri de intemperii. Se va acorda o grijă deosebită orientării fototranzistorului $T_1$. El trebuie montat vertical, cu fereastra de intrare a luminii spre cer, într-un loc deschis. Astfel, suprafața fotosensibilă va primi lumină în mod egal atît la răsăritul, cît și la apusul soarelui. Se va avea grijă ca lumina becului din montaj să nu cadă pe fototranzistor, deoarece aceasta perturbă funcționarea corectă a montajului.

O altă aplicație posibilă este iluminatul de siguranță al unor încăperi. În cazul întreruperii accidentale a iluminatului artificial, automatul asigură aprinderea unui bec de siguranță care, alimentat din baterie sau acumulator, permite continuarea activității în camera respectivă.

## CIFRU FOTOELECTRIC

Un sistem de închidere cu cifru nu permite accesul într-o încăpere, dulap sau casetă decît atunci cînd pe butoanele sale se formează o anumită combinație de cifre. Zăvoarele

obișnuite cu cifru sînt mecanice sau electrice cu contacte. Vom prezenta o variantă fotoelectrică ce se remarcă prin simplitate constructivă chiar pentru un număr mare de combinații.

Elementul principal îl constituie setul de discuri prezentat în figura 133. Fiecare disc are un orificiu practicat într-un anumit loc, permițînd trecerea unui fascicul de lumină prin

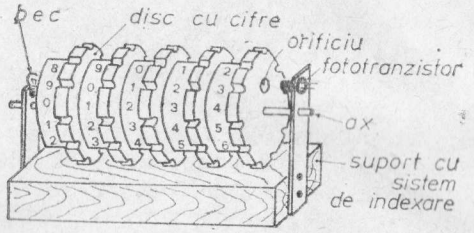



Fig. 133 — Vedere a „zăvorului" foto-electric.

tot setul într-o poziție particulară a discurilor. Această poziție este reperată prin cifrele scrise pe circumferință, care sînt vizibile din exterior.

În figura 134 este reprezentat un asemenea disc. El are o porțiune cu diametru mare, pe care sînt practicate 10

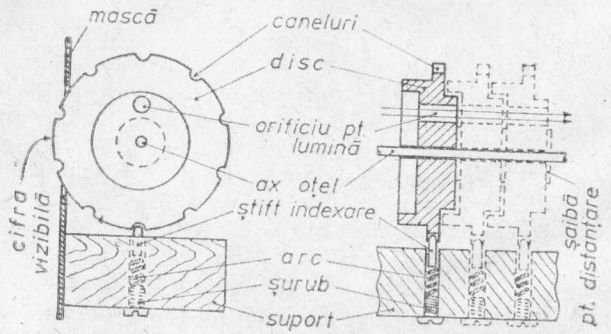



Fig. 134 — Discul și sistemul de indexare a poziției lui.



șanțuri (caneluri). Acestea au două roluri: servesc la acționarea cu mîna a discului din exterior și permit oprirea lui în anumite poziții bine determinate (indexarea poziției). O altă porțiune, cu diametrul mai mic, servește la notarea cifrelor pe circumferință. Gaura centrală permite introducerea discului pe axul de oțel gros de 1,5—2 mm. Un orificiu excentric cu diametrul de 3—4 mm servește la trecerea luminii. Profilul mai conține o degajare și o parte proeminentă, care asigură alăturarea discurilor ca în figură (contururile punctate) nepermițînd unui observator exterior să vadă orificiile prin spațiul dintre două discuri succesive.

Sistemul de indexare cuprinde cîte un știft cilindric cu cap semirotund, împins de un mic arc spiral înspre disc. Știftul intră în fiecare canelură a discului, care se oprește astfel în poziții bine determinate. Ghidarea axială a știftului și arcului este asigurată prin montarea lor într-o gaură făcută în suportul confecționat din lemn sau textolit.

O mască decupată din tablă, avînd forma indicată în figura 135, acoperă mecanismul și permite doar vederea unei cifre de pe fiecare disc.

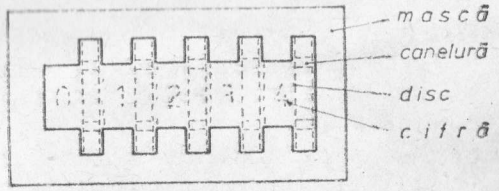



Fig. 135 — Masca frontală a sistemului de discuri.

Confecționarea discurilor se face pe strung, din plastic opac sau metal. Inscripționarea lor se efectuează prin gravare cu pantograful, ori scriind cifrele cu vopsea. Fiecare disc va avea o cifră specifică ce determină poziția în care lumina poate trece prin orificiu. Se pot confecționa discuri pentru toate cifrele, permițînd o multitudine de combinații. Practic cifrul se stabilește prin așezarea pe ax a discurilor corespunzătoare numărului dorit. De exemplu, pentru ca ușa să se

deschidă la combinația 79243 vom așeza în ordine discul pentru cifra 7, apoi 9, 2, 4 și 3. Între discuri se va adăuga o șaibă de 0,5 mm grosime pentru micșorarea frecărilor.

Să revenim la montajul electronic. Sursa de lumină este un bec de 12 V/0,1 A. El se montează de o parte a pachetului de discuri, ca în figura 133. De cealaltă parte se amplasează un fototranzistor ce primește lumina becului în cazul cînd găurile practicate în discuri coincid. Un tub de 1 cm lungime ferește fotodetectorul de lumina ambiantă. Schema electrică este dată în figura 136. Cînd primește lumină, fototranzistorul este parcurs de un curent mare, care deschide

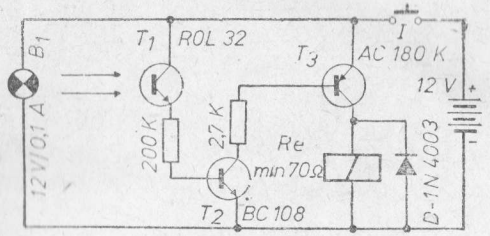



Fig. 136 — Schema electronică a „zăvorului" fotoelectric.

tranzistoarele $T_2$ și $T_3$. Releul este alimentat și contactul său normal deschis (nefigurat în schemă) alimentează un mecanism de deschidere a ușii.

Acest mecanism poate fi realizat într-o multitudine de variante. El poate fi un electromagnet ce atrage o armătură de fier ce deblochează ușa. Se poate folosi un motoraș electric care, printr-un angrenaj de demultiplicare, rotește un zăvor. În sfîrșit, o lamă bimetalică încălzită electric se deformează și poate debloca încuietoarea.

Amatorul va confecționa acest mecanism în funcție de situația concretă și de posibilități.

Întreg circuitul electronic se alimentează doar în momentul cînd vrem să deschidem ușa, prin întreruptorul $I$ tip sonerie. Deci, mai întîi formăm cifrul, apoi apăsăm pe $I$. Dacă memoria nu ne-a înșelat, se va acționa mecanismul de



deschidere a ușii. În acest fel consumul de curent este redus la minim, putîndu-se folosi baterii pentru alimentarea părții electronice. Dacă și motorașul de deschidere este alimentat de la baterie, sistemul devine independent de rețeaua electrică.

Dioda $D$ din schemă, conectată în paralel pe înfășurarea releului, servește la șuntarea tensiunii de autoinducție care apare la comutare. Ea protejează astfel tranzistorul de o eventuală distrugere.

În încheiere, un calcul amuzant privitor la numărul de discuri ce se poate folosi pentru confecționarea cifrului. Presupunînd că cineva vrea să deschidă ușa fără să știe cifrul, el trebuie să încerce toate combinațiile posibile. Să vedem cît timp i-ar lua această operație dacă schimbarea unei cifre necesită o secundă.

Pentru un „lacăt" cu 5 discuri (cifre) sînt posibile 99 999 numere, deci tot atîtea combinații a cîte 5 cifre, adică aproape 28 ore de căutare continuă. Pentru 8 discuri (99 999 999 numere) acest timp devine...3,2 ani!

Este evident preferabil să nu uităm combinația necesară.

## NUMĂRĂTOR FOTOELECTRIC

Numărarea automată a unor obiecte netransparente, care se deplasează, poate fi făcută pe cale fotoelectrică. Un fascicul de lumină este întrerupt de către obiectele în mișcare, iar un fotodetector sesizează aceste întreruperi și le transformă în semnale electrice. După amplificare, ele sînt numărate și afișate.

Numărătoarele fotoelectrice au avantajele următoare: lipsa unui contact direct cu obiectul, viteză mare de lucru și adaptare ușoară pentru diverse tipuri de obiecte. Ca exemple de utilizare se pot da: numărarea pieselor ce se mișcă pe o bandă rulantă, a persoanelor ce intră într-o expoziție, a obiectelor ce trebuie ambalate în cutii (cum sînt pastilele de medicamente) ș.a.m.d.

Vom prezenta un numărător fotoelectric simplu, a cărui schemă-bloc este dată în figura 137. Lumina emisă de un bec cade pe fotodioda $D_1$, acesta sesizînd întreruperile produse prin deplasarea obiectelor în calea fasciculului luminos.

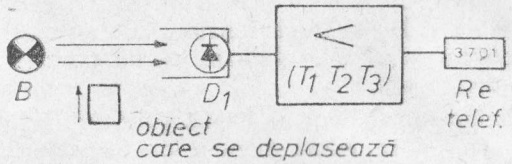



Fig. 137 — Schema-bloc a numărătorului.

Un amplificator cu trei tranzistoare acționează releul telefonic *Re*, care numără întreruperile fluxului de lumină. Acest contor este piesa esențială a schemei. El are aspectul din figura 138 și este folosit în centralele telefonice automate pentru contorizarea convorbirilor efectuate de abonați. Este format dintr-un electromagnet ce atrage o armătură mobilă cînd este alimentat cu curent. Spre deosebire de releele electromagnetice obișnuite, această armătură nu acționează niște contacte, ci un mecanism cu clichet. Astfel, un disc este rotit cu un anumit unghi la fiecare impuls de

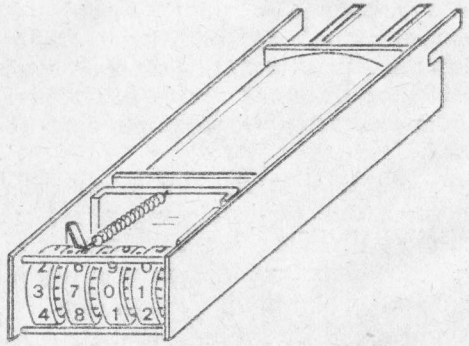


Fig. 138 — Contor telefonic electromagnetic.



curent. Pe circumferința discului sînt gravate cifre de la 0 la 9 și rotirea sa înseamnă afișarea unei alte cifre pe o fereastră existentă în carcasa releului. Cînd discul revine la zero, printr-un angrenaj este acționat un alt disc, aflat alături, care marchează unitățile de rang superior (zecile, apoi sutele și miile).

Un astfel de releu, ce funcționează la tensiunea de 6 V va fi folosit ca element final în schema din figura 139. Cînd nimic nu împiedică lumina să ajungă pe fotodioda $D_1$, un curent important o străbate și joncțiunea emitor-bază a lui

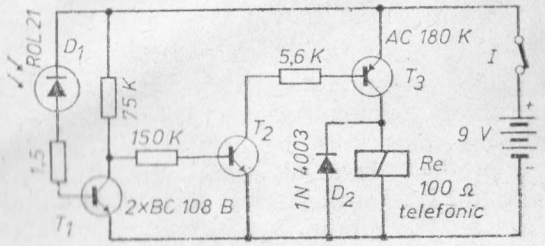



Fig. 139 — Schema de principiu a numărătorului fotoelectric.

$T_1$ este polarizată direct. Tranzistorul va conduce și tensiunea pe colectorul său este foarte mică, insuficientă pentru a-l deschide pe $T_2$. Ca urmare, nici $T_3$ nu are curent de bază, iar releul conectat în colectorul său nu este alimentat.

Dacă în calea luminii se interpune un obiect netransparent, $D_1$ va fi umbrită și curentul prin ea scade mult. Tranzistorul $T_1$ se blochează, iar tensiunea lui de colector crește. Se deschid $T_2$ și $T_3$, deci releul primește curent cît timp fotodioda este în întuneric. După ce obiectul a trecut, montajul revine la situația inițială, dar numărătorul indică o unitate mai mult. Fiecare nou obiect provoacă umbrirea lui $D_1$, deci apariția unui impuls de curent prin releu, acesta înregistrînd o unitate în plus.

Ca sursă luminoasă se poate folosi un bec de 3,5 V/0,2 A, situat la o distanță de maxim 20 cm față de fotodiodă. Dacă este montat într-un proiector, distanța poate crește la 2 m. Folosind o lanternă cu oglindă bună, care concentrează

fasciculul pe fotodiodă, se obțin acționări și de la 5 m distanță. În funcție de aplicația concretă se va alege una din variante.

Fotodioda se montează într-un tub negru, de 4—5 cm lungime, pentru a o feri de lumina ambiantă ce poate provoca perturbații. Oricum, această lumină trebuie să fie suficient de redusă pentru ca obiectele numărate să nu o trimită prin reflexie pe fotodiodă, anulînd astfel umbrirea provocată de întreruperea fasciculului principal.

Pentru o funcționare sigură, timpul de obturare a luminii primite de fotodiodă trebuie să fie mai mare de 0,2 secunde.

## AVERTIZOR PENTRU LANTERNELE ȘI STOPURILE AUTOTURISMULUI

Lumina produsă de unele becuri ale autoturismului nu este vizibilă din interiorul mașinii și, în consecință, remedierea defectelor ce se produc la aceste lămpi se face cu mare întîrziere. Este cazul becurilor de poziție din spate și al stopurilor, adică al luminilor esențiale pentru siguranța circulației pe timp de noapte și avertizarea celorlalți participanți la trafic asupra manevrei de frînare.

Montajul descris în continuare are rolul de a semnaliza șoferului lipsa luminii la oricare din lanternele din spate sau stopurile mașinii. În felul acesta repararea unei defecțiuni se poate face imediat ce s-a produs.

Schema montajului este dată în figura 140. Cu linii groase sînt reprezentate circuitele deja existente la orice autoturism „Dacia 1300". Contactorul $I_1$ se închide automat ori de cîte ori se apasă pedala de frînă, iar $I_2$ este întreruptorul luminilor de poziție. Pentru a realiza semnalizarea în caz de avarie, montajul dispune de două fototranzistoare, $T_1$ și $T_2$, montate în imediata apropiere a becurilor de stop și poziție. Amintim că fiecare bec are două filamente: unul de 5 W pentru poziție și altul de 21 W pentru stop. Deci fiecare fototranzistor controlează funcționarea a două filamente, printr-un artificiu al schemei ce va fi descris mai jos.



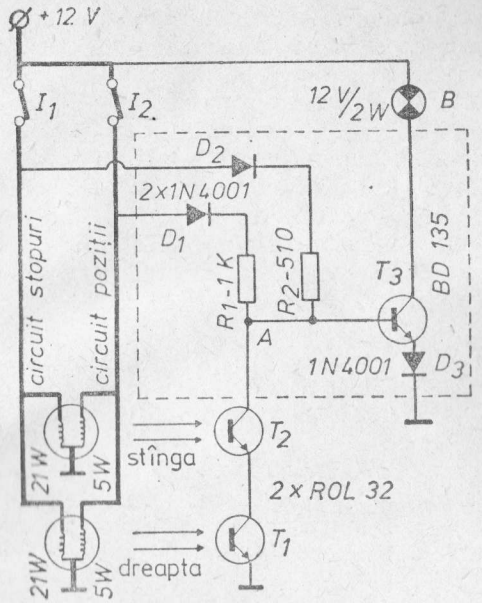



Fig. 140 — Schema de principiu a avertizorului.

Să urmărim funcționarea montajului. Avertizarea conducătorului auto se face printr-un bec roșu $B$ plasat la bord. Acest bec se aprinde cînd $T_3$ conduce, deci atunci cînd tensiunea pe baza sa depășește 1,2 V (suma tensiunilor de deschidere a joncțiunii emitor-bază și a diodei $D_3$). Baza este conectată în nodul de circuit $A$ ce se găsește pe un divizor de tensiune, format din $R_1$ (sau $R_2$, sau $R_1$ și $R_2$ montate paralel), $T_1$ și $T_2$. Tensiunea în punctul $A$ depinde de rezistoarele conectate în divizor și de lumina pe care o primesc fototranzistoarele. Distingem trei situații de funcționare a montajului.

1. Întreruptorul $I_1$ este deschis, iar $I_2$ închis. Este cazul circulației pe timp de noapte, cu pozițiile aprinse.

Prin $I_2$ este conectat $R_1$ ca rezistor de sarcină a fototranzistoarelor. Dacă filamentele de 5 W funcționează normal, $T_1$ și $T_2$ primesc un flux luminos corespunzător. Punctul de funcționare $P_1$ (fig. 141) se găsește într-o zonă unde curentul este mare, iar tensiunea foarte redusă (sub 0,6 V pe fiecare fototranzistor). În punctul $A$ tensiunea este deci sub 1,2 V; $T_3$ nu se deschide și becul $B$ nu luminează.

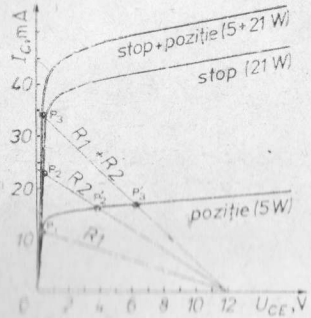



Fig. 141 — Curbele caracteristice și punctele de funcționare corespunzătoare diverselor regimuri de lucru ale fototranzistorului.

Dacă există însă un defect al unui bec de poziție, punctul $P_1$ se deplasează spre tensiuni mari (la 12 V), $T_3$ intră în conducție, iar $B$ se aprinde semnalizînd defectul.

2. Întreruptorul $I_2$ este deschis, iar $I_1$ închis. Este cazul frînării în timpul zilei.

În această situație sînt alimentate doar ștopurile. Două filamente de 21 W luminează normal, $T_1$ și $T_2$ primesc un flux luminos intens. Rezistorul lor de sarcină este acum $R_2$, iar punctul de funcționare — $P_2$. Tensiunea pe fototranzistoare este deci foarte mică și $T_3$ nu conduce.

Scăderea fluxului de lumină pe oricare fototranzistor deplasează însă punctul de funcționare spre tensiuni mai mari (de pildă, în $P_2'$) și becul $B$ luminează.

3. Ambele întreruptoare $I_1$ și $I_2$ sînt închise. Este cazul frînării pe timp de noapte.



Dacă filamentele luminează (5 + 21 W), $T_1$ și $T_2$ sînt iluminate foarte intens. Rezistorul lor de sarcină este constituit acum din $R_1$ și $R_2$ legate în paralel (338 ohmi), punctul de funcționare fiind $P_3$. Scăderea fluxului luminos prin defectarea unui filament de 21 W este suficientă pentru a deplasa punctul $P_3$ în $P_3'$, unde tensiunea este mare, deci $T_3$ se deschide, iar becul $B$ luminează. Dispariția luminii produsă de un filament de 5 W nu este sesizată în această situație, deci pe timpul frînării se pierde controlul asupra pozițiilor. Acest lucru nu este supărăror deoarece frînarea are o durată mică, iar controlul se reia automat la terminarea ei, cînd $I_1$ se deschide și se ajunge în situația de la punctul 1.

Diodele $D_1$ și $D_2$ împiedică interconectarea circuitelor de poziție și stop. Dioda $D_3$ menține potențialul emitorului la 0,6 V și ridică pragul de deschidere al lui $T_3$ la circa 1,2 V. Este util ca $T_3$ să fie montat pe un radiator de aproximativ 10 cm$^2$.

Porțiunea de circuit delimitată cu o linie întreruptă se va realiza pe o plăcuță de textolit ce se închide într-o cutie. Fiecare fototranzistor va fi fixat cu prenadez sau cu rășină epoxidică în capul filetat al unei banane radio ca în figura 142 a. El se prinde cu o piuliță M8 într-o gaură practicată

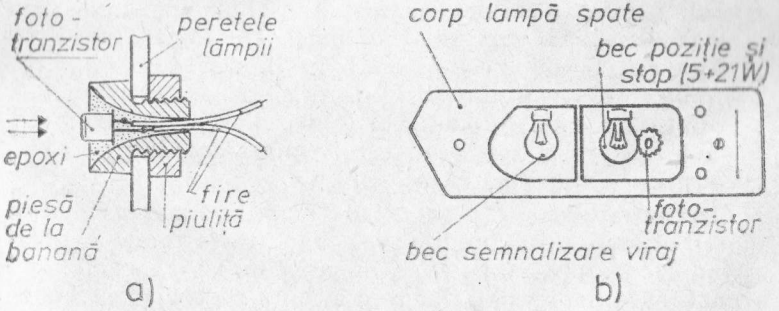



Fig. 142 — Fixarea fototranzistorului în corpul unei banane radio (a) și montarea acestui ansamblu în lampa de poziție (b).

la locul potrivit în peretele de plastic al lămpii din spate (fig. 142 b).

O observație interesantă: în momentul conectării luminilor de poziție sau cînd se frînează, rezistențele de sarcină corespunzătoare sînt alimentate de la plusul acumulatorului și montajul intră instantaneu în funcțiune. Dar filamentele becurilor mașinii au o oarecare inerție termică și luminează după cîteva zecimi de secundă din momentul conectării lor. În acest interval avertizorul nostru nu primește lumină și se aprinde becul roșu la bord ($B$ fiind de curent mic are un filament mai subțire și inerție mică). Deci becul $B$ clipește foarte scurt la aprinderea pozițiilor și la fiecare frînare. Acesta nu este un inconvenient ci, dimpotrivă, constituie o verificare permanentă a integrității automatului. Doar o aprindere prelungită pe toată durata frînării sau funcționării pozițiilor indică defectarea unuia din becurile respective.

De asemenea, avertizorul semnalizează și în cazul montării greșite a becului (21 W în circuitul de poziție și 5 W la stop), deoarece fluxul luminos la frînare nu este suficient de intens.

## AUTOMAT PENTRU APRINDEREA LUMINII ÎN TIMPUL NOPȚII

Unele încăperi, curți, străzi, semnalizatoare ori balize trebuie iluminate permanent în timpul nopții, dar nu și ziua cînd consumul de energie ar fi inutil. De aceea aprinderea și stingerea automată a luminii, în funcție de iluminarea naturală, este de o mare utilitate practică. Ea este posibilă prin folosirea unui fotodetector și a unui circuit electronic.

Schema unui astfel de montaj este prezentată în figura 143. Să urmărim funcționarea acestuia.

În timpul zilei fototranzistorul $T_1$ este iluminat și curentul care îl străbate este amplificat de $T_2$. Acesta conduce, polarizînd la rîndul său pe $T_3$. Cuplarea directă a celor trei tranzistoare (montaj Darlington) asigură un coeficient foarte mare de amplificare și deci o sensibilitate ridicată. Tranzistorul $T_3$ conduce, astfel încît tensiunea lui de colector este



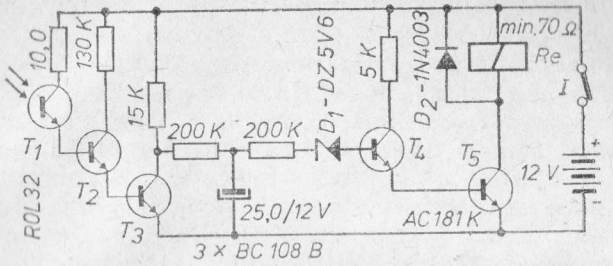



Fig. 143 — Schema de principiu a automatului pentru iluminat.

foarte mică, practic zero. Această tensiune se regăsește la bornele capacitorului electrolitic conectat în paralel pe $T_3$. Grupul de tranzistoare $T_4$ — $T_5$ nu conduce și releul nu este alimentat. Contactul său normal deschis (nefigurat în schemă) nu permite trecerea curentului prin circuitul becurilor folosite pentru iluminat.

La lăsarea serii $T_1$, $T_2$, și $T_3$ se blochează, iar tensiunea pe colectorul lui $T_3$ crește treptat. Cînd ea depășește valoarea de aproximativ 6 5 V se străpunge dioda Zener, iar $T_4$ și $T_5$ intră în conducție. La o anumită valoare a curentului prin bobina releului acesta anclanșează și contactul său închide circuitul lămpilor pentru iluminat.

Rolul capacitorului este de a introduce o întîrziere (temporizare) de 3—4 secunde în procesul de comutare. Chiar dacă $T_1$, $T_2$ și $T_3$ se blochează brusc, tensiunea pe capacitor crește încet, el încărcîndu-se lent prin rezistorul de 200 kΩ. De-abia peste 3—4 secunde va atinge valoarea la care se deschid tranzistoarele finale. Această temporizare este necesară pentru a evita declanșarea releului în timpul zilei, la întunecări accidentale de scurtă durată produse de pildă de zborul unei păsări în apropierea fototranzistorului.

Se poate deduce ușor funcționarea montajului la răsăritul soarelui. Lumina se intensifică, grupul primelor trei tranzistoare intră în conducție și tensiunea pe capacitor scade. Tranzistoarele $T_4$ și $T_5$ se blochează, iar releul declanșează. Temporizarea se manifestă și în acest caz. Astfel, chiar dacă

fototranzistorul este iluminat brusc, tensiunea pe capacitor scade lent, el descărcîndu-se în 3—4 secunde prin $T_3$ și prin joncțiunile bază-emitor ale tranzistoarelor finale. Ca urmare, releul nu va stinge lumina datorită fulgerelor din timpul nopții, farurilor unui autovehicul care trece prin acel loc sau altor iluminări accidentale de scurtă durată. Dioda $D_2$ protejează montajul contra tensiunilor de autoinducție ce pot apare la comutare. Alimentarea se va face de la un redresor.

Fototranzistorul trebuie orientat vertical, cu fereastra spre cer, pentru a primi lumină atît la răsărit, cît și la apus. El va fi ferit de lumina becurilor comandate de montaj sau de alte surse de lumină artificială din preajmă. Pe timpul iernii trebuie protejat de zăpada care îl poate acoperi. Aprinderea luminii se face cu circa 40 de minute după apusul soarelui, iar stingerea — cu 40 de minute înainte de răsărit. Desigur, pe timp noros, ploaie sau ceață acești timpi se modifică apreciabil.

Remarcăm similitudinea în funcționare cu lampa automată de poziție care a fost descrisă mai înainte. Montajul prezentat acum are însă următoarele avantaje: sensibilitate mai mare la lumină, temporizare la aprinderea și stingerea luminii și comutare bruscă a circuitului de utilizare prin contactele releului.

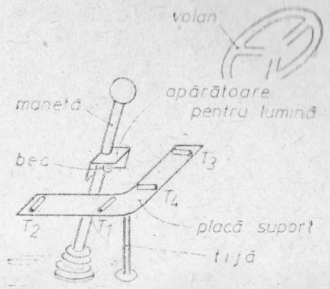
## INDICATOR PENTRU MANETA DE VITEZE

Un circuit electronic care afișează prin aprinderea unor beculețe viteza în care este cuplat motorul autoturismului constituie un divertisment amuzant pentru pasageri și este util conducătorilor auto începători.

La montajul ce va fi descris mai jos, sesizarea poziției manetei schimbătorului de viteze se face pe cale fotoelectrică. Figura 144 reprezintă traductorul utilizat în acest scop. Pe maneta amplasată la podea este fixat un bec de 2—3 W. Poziția lui este detectată de către montajul electronic prin



Fig. 144 — Traductor fotoelectric pentru poziția manetei.




intermediul a patru fototranzistoare așezate în jurul becului, ca în desen.

Pentru mai multă claritate s-a reprezentat în figura 145 o vedere de sus schematică a principalelor elemente. Cele cinci poziții posibile ale manetei (deci becului) s-au notat cu cifre romane atunci cînd corespund vitezelor I, II, III, IV și cu inițialele PM pentru punctul mort. Liniile punctate indică „deschiderea unghiulară" în care fiecare fototranzistor poate

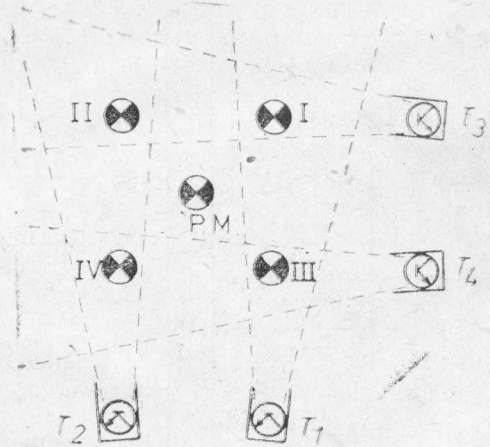
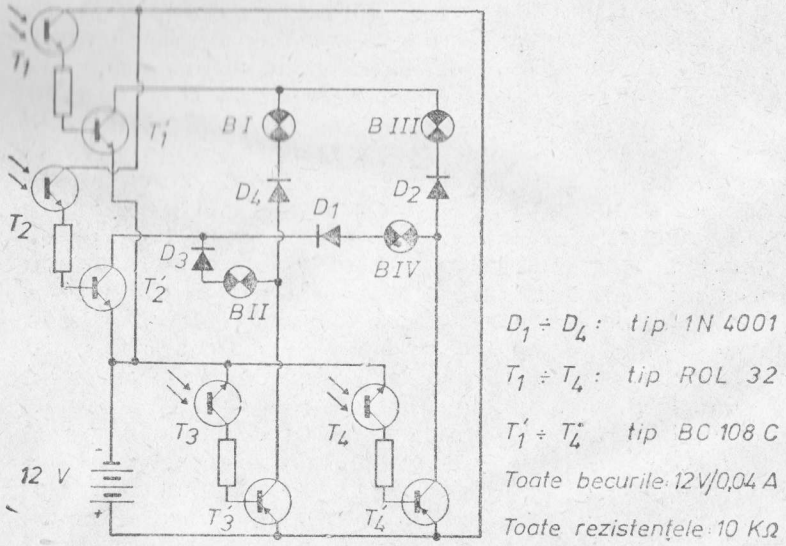



Fig. 145 — Schema amplasării fototranzistoarelor.

primi lumina de la bec. În fiecare din cele patru poziții, corespunzînd unei anumite viteze, o altă pereche de fototranzistoare primește lumină. De exemplu, în viteza I sînt iluminate $T_1$ și $T_3$, în viteza a II-a — $T_2$ și $T_3$ ș.a.m.d. Cînd maneta se află la punctul mort, nici unul din fototranzistoare nu primește lumină.

Un circuit electronic amplifică curenții fototranzistoarelor iluminate și comandă aprinderea unor beculețe la bord, corespunzător treptei de viteză cuplate. Schema este dată în figura 146. Fiecare fototranzistor este urmat de un etaj de amplificare, realizat cu un singur tranzistor. Beculețele *B I — B IV* sînt astfel conectate încît fiecare din ele se aprinde numai dacă o anumită pereche de fototranzistoare este iluminată. Să exemplificăm: atunci cînd maneta se află în viteza I, $T_1$ și $T_3$ sînt iluminate, deci conduc. Vor intra în conducție și tranzistoarele $T'_1$, $T'_3$ datorită creșterii curentului




$D_1 \div D_4$ : tip 1N 4001

$T_1 \div T_4$ : tip ROL 32

$T'_1 \div T'_4$ tip BC 108 C

Toate becurile 12V/0,04 A

Toate rezistențele 10 KΩ

Fig. 146 — Schema de principiu a indicatorului.



bazei. Prin $T'_1$ se conectează la minusul sursei becurile *B I* și *B III*, iar prin $T'_3$ se aplică plusul pe becurile *B I* și *B II*. Observăm că doar filamentul lui *B I* este legat direct între plusul și minusul sursei, deci numai el luminează, indicîndu-ne faptul că ne aflăm în viteza I.

Similar se poate demonstra că becul *B II* luminează cînd maneta este în viteza a II-a ș.a.m.d.

Diodele împiedică producerea unui fenomen nedorit: odată cu alimentarea unui bec, celelalte trei înseriate ar primi tensiunea de 12 V și ar lumina slab. Nepermițînd trecerea curentului decît într-un sens, una din diode blochează acest circuit suplimentar. De exemplu, în situația vitezei I analizată mai sus, $D_1$ împiedică circulația unui curent de la colectorul lui $T'_3$ (plus) prin *B II*, *B IV* și *B III* la colectorul lui $T'_1$ (minus). La fel $D_2$ pentru viteza a doua ș.a.m.d.

Dacă maneta este în punctul mort, nici unul din becuri nu se aprinde. Acest lucru se întîmplă chiar dacă accidental, din cauza jocului pe care-l prezintă sistemul de indexare a poziției manetei, unul din fototranzistoare primește lumină. Este necesar ca două fotodetectoare să fie iluminate simultan pentru ca unul din beculețele de semnalizare să se aprindă.

Pentru realizarea practică se va ține seama că distanța între becul atașat manetei și fototranzistoare nu trebuie să depășească 10 cm. O apărătoare din tablă subțire va fi montată pe manetă pentru a feri conducătorul de lumina directă a becului. Ansamblul de fototranzistoare este fixat pe un suport cu forma din figura 144, confecționat din lemn sau plastic. Fiecare fototranzistor este închis într-un tub de circa 3 cm lungime, pentru a-i mări directivitatea. Fixarea lui în poziția finală pe suport (prin lipire sau cu colier de tablă) se face testînd individual fototranzistorul. Se leagă cele două terminale la bornele unui ohmmetru cu tensiunea bateriei cuprinsă între 1,5 și 9 V; colectorul va fi conectat la plusul aparatului. Cînd este iluminat fototranzistorul, rezistența indicată de aparat scade mult. Astfel ne asigurăm că în poziția respectivă de montare, el primește lumină de la bec numai atunci cînd maneta se află în vitezele corespunzătoare (vezi figura 145).

Becurile de semnalizare sînt de tipul folosit la trenulețele electrice. Nu se vor utiliza becuri cu un consum mai mare deoarece se suprasolicită tranzistoarele. Montarea lor se face pe bordul mașinii; eventual ele se vopsesc în culori diferite.

Alimentarea circuitului se face de la acumulator, curentul trecînd prin contactul general (cheie) pentru a ne asigura deconectarea la părăsirea mașinii.

## TELECOMANDĂ CU LUMINĂ

Comanda de la distanță a unor aparate sau dispoziții de automatizare se poate realiza fără fir, cu ajutorul luminii. Putem acționa în acest mod de la cîțiva metri distanță pornirea și oprirea televizorului, radioului sau magnetofonului, aprinderea și stingerea luminii într-o cameră, deschiderea unei uși etc. Datorită telecomenzii optice se elimină firele cu tensiunea rețelei, ce ar trebui întinse prin cameră, înlocuindu-se cu un fascicul luminos produs de un mic „proiector" portabil, confecționat dintr-o lanternă.

Principiul de funcționare al montajului din figura 147 este următorul: două fototranzistoare acționează, prin intermediul unor amplificatoare de curent continuu, un releu ce închide sau deschide circuitul aparatului telecomandat.

Fototranzistorul $T_1$ servește la anclanșarea releului („startul" aparatului); prin el trece un curent suficient de mare

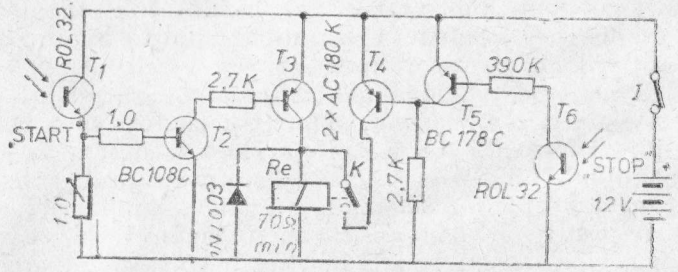



Fig. 147 — Schema montajului pentru telecomanda optică.



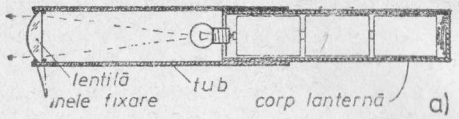
pentru a-l deschide pe $T_2$ și, implicit, pe $T_3$. Bobina releului va fi parcursă de un curent intens și se va produce anclanșarea. Releul are două contacte, normal deschise. Unul din ele (nefigurat în desen) va asigura consumatorului telecomandat alimentarea electrică. Celălalt este contactul $K$, prin care se conectează tranzistorul $T_4$ în paralel pe $T_3$. Observăm însă că baza lui $T_4$ este la un potențial negativ în raport cu emitorul, deoarece $T_6$ nu este iluminat, iar $T_5$ este blocat. Deci $T_4$ intră în conducție în momentul închiderii lui $K$ și prin acest tranzistor se va asigura menținerea pe timp nelimitat a stării anclanșate a releului. Ca urmare, aparatul va rămîne alimentat chiar dacă iluminarea fototranzistorului de start încetează. Practic este necesar doar un scurt impuls luminos pe $T_1$ (zecime de secundă) pentru a face ca releul să anclanșeze și să rămînă în această poziție.

Declanșarea releului și oprirea aparatului comandat se face prin iluminarea fototranzistorului $T_6$ („stop"). Intrînd în conducție, el polarizează pe $T_5$ care va conduce la rîndul său. Tensiunea pe baza lui $T_4$ se apropie de $+12$ V și acest tranzistor se blochează. El nu mai asigură curentul necesar releului $Re$ care declanșează. Contactul $K$ și circuitul consumatorului se deschid.

Și în cazul acesta este necesar un impuls scurt de lumină pentru acționarea lui $T_6$, deoarece odată deschis $K$, releul nu mai poate primi curent prin $T_4$ și rămîne în starea declanșat. Doar iluminarea fototranzistorului de start provoacă reanclanșarea lui și astfel, ciclul descris se repetă.

În rezumat, este suficient să trimitem de la distanță un scurt impuls de lumină pe $T_1$ sau $T_6$ și aparatul telecomandat pornește și, respectiv, se oprește.

„Proiectorul" cu care vom acționa este confecționat dintr-o lanternă cu trei baterii cilindrice (fig. 148 a). În loc de oglindă, se va atașa la corpul lanternei un tub de carton sau tablă, ce are montat la capăt o lentilă convergentă. Se recomandă diametrul de 25 mm și distanța focală 10—15 cm. Becul trebuie să aibă spirala filamentului cît mai strînsă și bine centrată în balonul de sticlă (este vorba de un bec de



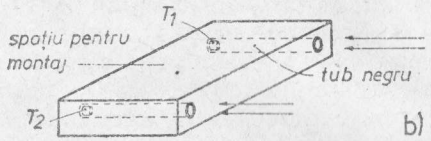




Fig. 148 — a) Proiector; b) Montarea fototranzistoarelor pentru telecomandă.

8,5 V la 0,2 A. Pe întuneric vom face următorul reglaj: apropiem și depărtăm lentila de bec pînă ce obținem pe un perete situat la circa 3 m depărtare o imagine cît mai clară a filamentului. În acest moment putem fixa definitiv tubul pe corpul lanternei și lentila în tub.

După experimentare, montajul se închide într-o cutie (fig. 148 b) împreună cu un redresor capabil să asigure curentul releului. Fototranzistoarele vor fi amplasate la minimum 20 cm distanță unul de altul pentru a putea fi iluminate separat și „ochite" ușor cu proiectorul. În scopul micșorării influenței luminii ambiante, fiecare fototranzistor se montează într-un tub negru, cu diametrul de 6 mm și lungimea de 5 cm. Tubul se orientează spre direcția din care vom efectua telecomanda. Se va avea grijă ca pe această direcție să nu existe alte surse de lumină care pot perturba funcționarea sistemului.

Reglajul final constă în ajustarea poziției potențiometrului, astfel încît sensibilitățile la lumină ale etajelor „start" și „stop" să fie egale. Vom afla mai întîi, experimental, distanța maximă la care mai poate fi acționat „stopul". Apoi vom mări valoarea rezistenței reglabile pînă cînd „startul" va putea fi acționat de la aceeași distanță. În cursul reglajului vom înlătura orice altă sursă de lumină. Distanța maximă de acționare este 3—4 metri.





La mărirea negativelor pe hîrtie fotografică, una din operațiile cele mai importante este stabilirea corectă a timpului de expunere. O fotografie cu nuanțe prea închise, fără strălucire, este rezultatul unei expuneri prelungite peste normal, iar o imagine fără negru, în tonuri prea deschise, este rezultatul unui timp de expunere insuficient. De obicei expunerea la mărire se stabilește pe baza experienței fotografului și a unor probe inițiale. Un aparat care determină timpul corect de expunere și deconectează automat becul aparatului de mărire după scurgerea acestui interval este de o utilitate indiscutabilă. El permite o substanțială economie de timp prin eliminarea probelor și eliberează pe operator de efortul necesar cronometrării exacte a fiecărei fotografii și calculelor de corecție ce trebuie făcute cînd se schimbă raportul de mărire sau diafragma.

Figura 149 înfățișează schema unui astfel de automat. El folosește un fototranzistor pentru măsurarea cantității de lumină incidentă pe planșeta aparatului de mărit și, în funcție de aceasta, stabilește timpul necesar exp merii.

Atunci cînd comutatorul $I_2$ se află în poziția *1*, un capacitor se încarcă la tensiunea pe care o furnizează divizorul rezistiv compus din potențiometru și rezistorul de 500 Ω. În funcție de poziția cursorului, această tensiune are o anu-

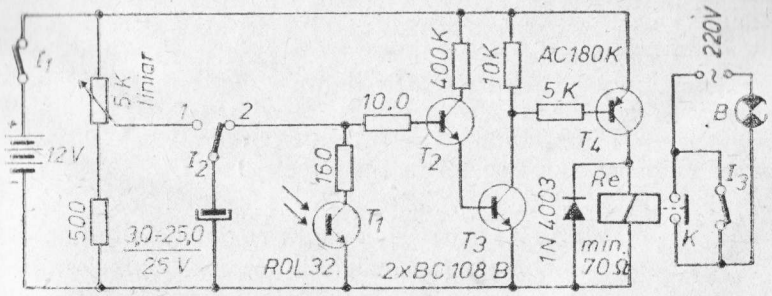



Fig. 149 — Schema automatului pentru expunere la măririle fotografice.

mită valoare, cuprinsă între 2 și 12 V. Capacitorul stochează o cantitate de electricitate proporțională cu tensiunea amintită.

Prin trecerea din poziția *1* în *2* se întrerupe încărcarea capacitorului și începe descărcarea lui prin fototranzistorul $T_1$ (rezistorul de 10 MΩ poate fi neglijat în acest moment). Prin fototranzistor trece un curent proporțional cu iluminarea lui și practic independent de tensiunea emitor-colector. Astfel capacitorul se descarcă sub curent constant și tensiunea sa scade liniar în timp. Viteza de scădere (panta dreptei) depinde de iluminarea fototranzistorului.

Lanțul de amplificare format de tranzistoarele $T_2$, $T_3$ și $T_4$ acționează un releu ce închide circuitul de alimentare a becului aparatului de mărit. Releul este anclanșat atît timp cît tensiunea pe baza lui $T_2$ este mai mare decît aproximativ 1,2 V. Deci becul funcționează în intervalul de timp în care capacitorul se descarcă de la tensiunea inițială pînă la valoarea menționată mai sus. Acest timp este invers proporțional cu curentul de descărcare, determinat la rîndul său de iluminarea fototranzistorului.

Din descrierea modului de funcționare rezultă că, în timpul expunerii, fototranzistorul trebuie să primească o parte din lumina incidentă pe planșeta aparatului de mărit. Deoarece el nu poate fi plasat pe hîrtia fotografică, unde ar lăsa o umbră, va fi așezat pe rama ce menține hîrtia plană, în imediata apropiere a marginii imaginii. Întotdeauna imaginea proiectată este puțin mai mare (cel puțin pe o latură) decît încadrarea finală pe hîrtie; fototranzistorul va primi o parte din această lumină. În figura 150 a este arătat un suport de lemn sau plastic pentru montarea fototranzistorului, iar în figura 150b se indică un exemplu de amplasare a lui $T_1$ pe rama planșetei în timpul expunerii.

Practic operația de mărire decurge ca mai jos:

— se alege raportul de mărire și încadrarea optimă din punct de vedere al compoziției imaginii,

— se reglează claritatea și se alege diafragma pe inelul obiectivului;



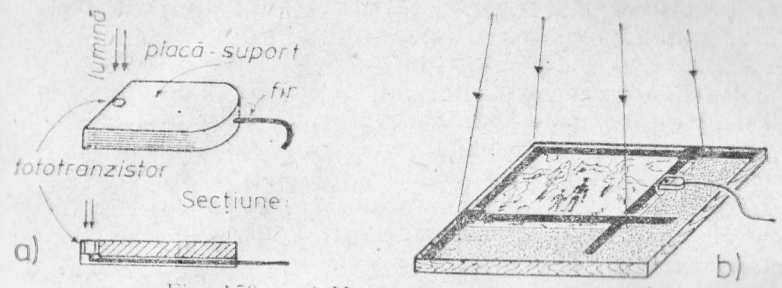



Fig. 150 — a) Montură pentru fototranzistor; b) Așezarea fotodetectorului pe planșeta aparatului de mărit.

— se interpune filtrul roșu al aparatului și se așază hîrtia în ramă;

— se plasează fototranzistorul într-o regiune cît mai luminoasă a imaginii proiectate pe ramă;

— se stinge manual becul (din $I_3$) și se îndepărtează filtrul roșu;

— se trece $I_1$ din poziția *1* în, poziția *2*. Automat se va aprinde becul aparatului (prin releu), iar după un timp se va stinge singur;

— se revine în poziția *1* a comutatorului $I_2$ și se scoate hîrtia din ramă. Se face developarea normală a ei.

Este necesară o etalonare prealabilă a aparatului, prin efectuarea unei serii de probe în urma cărora se va stabili poziția optimă a cursorului potențiometrului pentru fiecare tip de hîrtie și rețetă de revelator utilizat. Butonul cursorului se va grada în 50—100 unități arbitrare pentru a putea repera poziția lui exactă. Pentru un anumit tip de hîrtie și revelator, fără film în aparat, se fac probe prin expunere automată, deplasînd cu cîteva diviziuni butonul la fiecare probă, de la masă spre plus. După developare normală se va determina proba de la care hîrtia este complet neagră. Diviziunea corespunzătoare acestei probe se va folosi ori de cîte ori utilizăm hîrtia și revelatorul respectiv. La mărirea cu clișeu în aparat, fototranzistorul trebuie plasat într-o zonă

a imaginii cît mai luminoasă, deci care trebuie să fie redată pe fotografie prin negru intens.

Tot cu ocazia acestor probe se stabilește, prin încercări, valoarea optimă a capacitorului. Ea trebuie să asigure timpul corect de expunere și în cazul hîrtiilor celor mai sensibile. Deoarece nivelele de iluminare diferă după puterea becului și sistemul optic folosit, vom determina capacitatea necesară încercînd diverse capacitoare, de la valori mici spre valori mari, oprindu-ne la cea care asigură un timp suficient de expunere.

Montajul se închide într-o cutie, împreună cu un redresor pentru alimentare. Din exterior vor fi accesibile: comutatorul $I_2$, butonul potențiometrului, întreruptoarele $I_1$, $I_3$ și o priză pentru conectarea ștecherului aparatului de mărit.

## TIR CU LUMINĂ

Pentru antrenament în vederea competițiilor de tir sportiv sau pentru verificarea și educarea atenției și agilității se poate folosi un pistol cu... lumină. Este vorba de un proiector care trimite un impuls luminos scurt și concentrat în direcția unui element fotosensibil. Dacă acesta a fost atins de lumină, un montaj electronic semnalizează reușita prin aprinderea unui bec timp de cîteva secunde.

Pistolul conține circuitul de formare a impulsurilor de lumină, prezentat în figura 151. Un capacitor electrolitic de capacitate mare se încarcă printr-un rezistor la tensiunea de 9 V a bateriei. Cînd se apasă pe trăgaci, se închide contactul $I$ (tip sonerie) care conectează becul la bornele capacitorului. Energia electrică înmagazinată în acesta determină trecerea unui impuls de curent prin filament. Deși are o valoare mai mare decît curentul nominal al becului, acest impuls este totuși suportat de filament deoarece durata sa este scurtă (circa 0,5 secunde). Becul emite în acest timp un impuls luminos. Odată descărcat capacitorul, filamentul rămîne în serie cu rezistorul, primește doar o tensiune mică și nu mai luminează. Pentru un nou „foc" trebuie ridicat degetul de pe trăgaci. Astfel se deschide $I$, iar capacitorul se reîncarcă în 3—4 secunde din baterie; după acest timp se poate „trage" un alt impuls luminos.

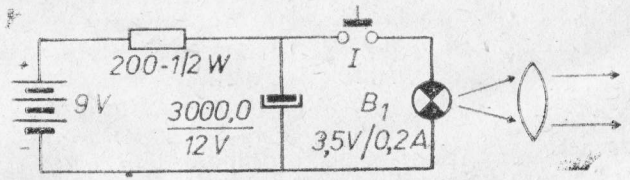


Fig. 151 — Circuit pentru producerea impulsurilor luminoase.



Realizarea practică a pistolului se poate face ca în figura 152, unde s-a indicat locul principalelor elemente ale schemei electrice. Carcasa provine de la o jucărie cu dimensiuni

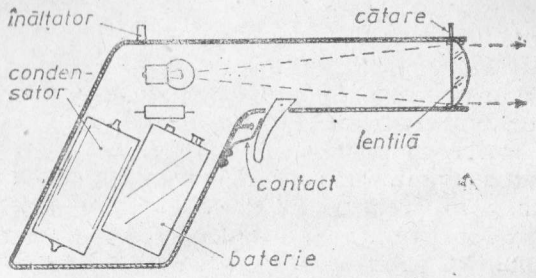


Fig. 152 — Amplasarea elementelor în corpul pistolului.

convenabile. Contactul este făcut dintr-o fîșie de tablă elastică, montată astfel încît apăsată de trăgaci, atinge un cui. Sistemul optic cuprinde becul, montat în focarul unei lentile convergente cu diametrul 20—25 mm și distanța focală mai mare de 10 cm. La diametre mai mici scade mult cantitatea de lumină trimisă spre țintă. O distanță focală mai mică face ca pata de lumină proiectată pe lentilă (imaginea filamentului) să fie prea mare. Se va alege un bec cu filamentul concentrat într-o zonă cît mai mică (spirală mai strînsă) și drept.

Poziția exactă a becului trebuie reglată cu multă grijă, pentru ca fasciculul luminos trimis de pistol să fie paralel cu axa țevii. Pentru acesta se fixează pistolul pe o masă — cu bandă adezivă, de pildă — și se vizează prin înălțător un punct de pe un perete situat la 3—4 m distanță (fig. 153). O altă persoană marchează acest punct, cu o pioneză. Apoi

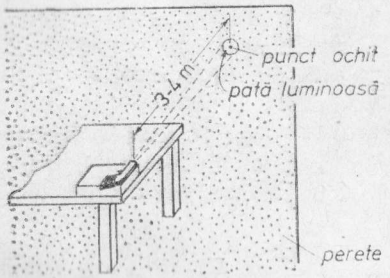



Fig. 153 — Reglajul sistemului optic al pistolului.

se alimentează becul la tensiunea de 4,5 V și, pe întuneric, se urmărește pe zid pata luminoasă produsă de pistol. Se reglează distanța bec-lentilă și poziția becului pînă ce pata va fi cît mai mică și concentrică cu punctul vizat. Acum pistolul este calibrat și becul se blochează în această poziție.

În carcasă se va practica o deschidere în dreptul becului, pentru reglajul descris mai sus și pentru verificarea aprinderii becului de către trăgător sau concurenți în cazul „competițiilor" cu prietenii.

Să trecem la prezentarea receptorului de lumină. Montajul din figura 154 realizează următoarele funcții: fototranzistorul $T_1$ primește impulsul luminos și îl transformă în impuls electric; $T_2$ îl amplifică; circuitul monostabil cu $T_3$, $T_4$ memorează circa trei secunde primirea impulsului, iar amplificatorul $T_5$ — $T_6$ aprinde un bec pe tot acest interval de timp, semnalizînd „punct lovit".

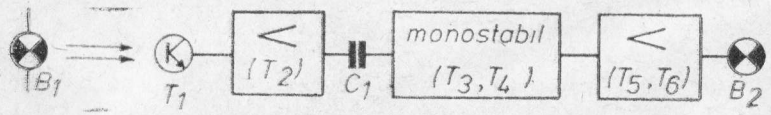



Fig. 154 — Schema-bloc a receptorului de lumină.



Schema detaliată a montajului este dată în figura 155. La primirea impulsului luminos, $T_1$ intră în conducție și $T_2$ se deschide. Tensiunea pe colectorul lui $T_2$ scade brusc.

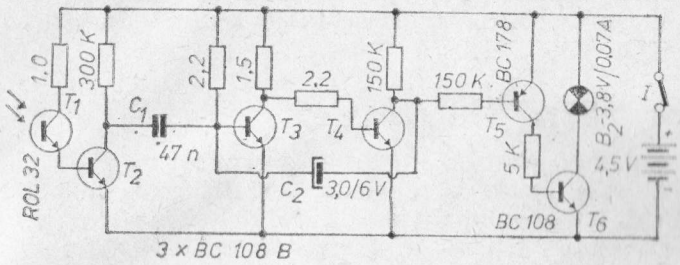



Fig. 155 — Schema detaliată a receptorului.

Un impuls de tensiune negativ este transmis prin capacitorul $C_1$ pe baza lui $T_3$. Tranzistorul $T_3$ împreună cu $T_4$, $C_2$ și rezistoarele înconjurătoare formează un circuit monostabil. Așa cum îi arată numele, el are o singură stare stabilă: cea în care $T_3$ conduce, $T_4$ este blocat, iar $C_2$ este încărcat. La primirea impulsului negativ pe bază, $T_3$ se blochează, îl deschide pe $T_4$ și prin acesta determină descărcarea lui $C_2$. Impulsul încetează foarte repede, dar monostabilul rămîne în această stare instabilă pînă cînd $C_2$ se încarcă din nou. Fenomenul durează 3—4 secunde pentru valorile indicate în schemă.

Pe tot acest interval de timp, tranzistorul $T_4$ fiind în conducție, determină deschiderea lui $T_5$ și $T_6$ care alimentează becul de semnalizare a reușitei. După aceea montajul revine la starea inițială și este gata să primească un nou impuls luminos. Dealtfel, constanta de timp a pistolului este egală cu cea a receptorului, așa că în momentul stingerii becului de semnalizare se poate trage un nou „foc".

Realizarea practică a receptorului se face într-o mică cutie ce conține și bateria de alimentare. Această cutie se va

așeza la locul dorit (de exemplu, pe un perete) și va constitui ținta. Fototranzistorul se montează într-un tub negru de 6—7 cm lungime. El va proteja fotodetectorul de lumina ambiantă. Becul de semnalizare se va monta în așa fel încît să fie vizibil pentru trăgător, dar lumina lui să nu ajungă pe fototranzistor. Distanța maximă la care poate fi acționat montajul de către pistolul descris este de 5—6 metri.

## COMANDA AUTOMATĂ A LUMINII ÎNTR-O CAMERĂ

Montajul electronic a cărui construcție va fi descrisă în continuare realizează aprinderea și stingerea automată a luminii într-o cameră unde intrarea și ieșirea se face printr-o singură ușă. Mai exact, lumina se aprinde automat cînd cineva intră în cameră și se stinge tot automat atunci cînd persoana părăsește încăperea.

Acest sistem poate fi folosit în camerele de locuit, bucătării, camere de baie, cămări etc. Utilitatea unei asemenea automatizări constă în eliminarea manevrei de acționare manuală a comutatorului, realizînd o economie de curent, un plus de comoditate și o siguranță sporită în încăperile unde se folosește apa și există posibilitatea accidentelor prin electrocutare dacă comutatorul prezintă defecțiuni de izolație.

Schema bloc este dată în figura 156. Elementele de comandă sînt întreruptoarele $I_1$, $I_2$ și fototranzistorul $T_1$. Becul din încăpere a fost notat cu $B$, releul $Re$ servind la aprinderea luminii în cameră. Pentru a înțelege modul de funcționare trebuie să precizăm locul de amplasare a ele-

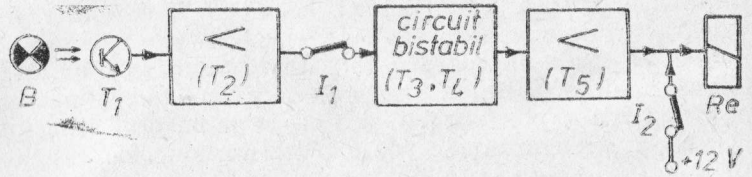



Fig. 156. — Schema-bloc a automatului pentru lumină.



mentelor de comandă. Întreruptoarele $I_1$ și $I_2$ se montează pe partea de sus a tocului ușii camerei (fig. 157 a) și sînt acționate prin manevrarea ușii. Se pot utiliza întreruptoare de tipul celor folosite la frigider pentru becul interior, montate pe un colțar de tablă ca în figura 157 b. Mai robuste sînt microîntreruptoarele cu știft, utilizate la mașina de găurit MG-4 pentru conectarea motorului; ele se fixează mai ușor, folosind două cuie sau șuruburi pentru lemn (fig. 157 c).

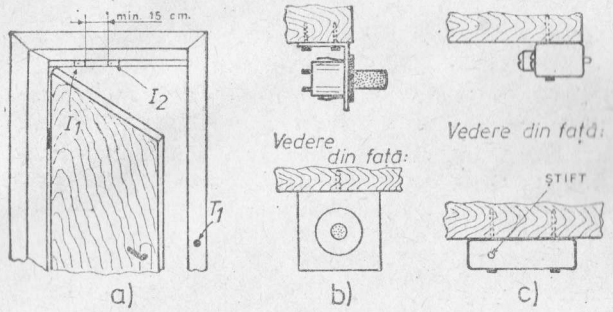



Fig. 157 — Amplasarea întreruptoarelor (a) și modul de montare a lor: întreruptor tip frigider (b) sau cu știft (c).

Indiferent de tipul folosit, $I_1$ va fi montat mai aproape de balamaua ușii, pentru ca la închidere să fie acționat înaintea lui $I_2$.

Fototranzistorul se montează în încăperea respectivă, în apropierea ușii. Locul său se alege cu grijă de către constructor, după următoarele criterii:

a) $T_1$ trebuie să primească lumină direct de la becul din încăpere.

b) Atunci cînd o persoană aflată în camera respectivă este în apropierea ușii (pentru a efectua închiderea sau deschiderea ei), fluxul luminos primit de $T_1$ de la bec trebuie să se micșoreze, adică $T_1$ trebuie să fie umbrit de corpul persoanei.

Să urmărim acum funcționarea montajului pe schema bloc și pe schema de detaliu din figura 158. Presupunem că inițial în cameră este întuneric, înăuntru nu se află nimeni, iar ușa este închisă.

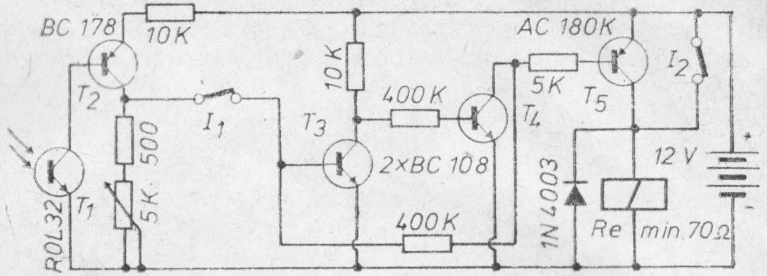



Fig. 158 — Schema automatului pentru comanda luminii.

O persoană vine din afară și deschide ușa. Contactul lui $I_2$ se închide primul, releul este alimentat de la plusul sursei și, prin contactul său normal deschis (care nu a fost figurat în desen), aprinde lumina în cameră. Persoana intră înăuntru și, stînd în calea luminii pe care $T_1$ o primește de la bec, se pregătește să închidă ușa. Fototranzistorul $T_1$ fiind umbrit, curentul prin baza lui $T_2$ este mic și acest tranzistor nu conduce. Tensiunea pe colectorul lui $T_2$ este apropiată de zero.

Atît timp cît ușa este încă deschisă, prin $I_1$ (închis) se aplică acest potențial scăzut pe baza lui $T_3$. Sistemul $T_3$—$T_4$ formează un circuit bistabil ce are două stări distincte: $T_3$ conduce și $T_4$ este blocat sau invers. Circuitul poate rămîne oricît timp în una din aceste situații. El basculează dintr-o stare în alta numai atunci cînd primește o tensiune de comandă pe baza lui $T_3$. În cazul descris mai sus tensiunea aplicată este foarte mică și $T_3$ va fi blocat. Evident — $T_4$ conduce; de asemenea $T_5$. Ca urmare, releul este alimentat și prin $T_5$.

În momentul închiderii ușii se deschid $I_1$ și $I_2$. Întreruptorul $I_1$ întrerupe legătura fototranzistorului cu bistabilul, lăsîndu-l pe cel din urmă în starea descrisă mai sus. Întreruptorul $I_2$ deschide circuitul de alimentare directă a releului, dar acesta continuă să primească curent prin $T_5$ și lumina arde în cameră. Acum, indiferent de starea lui $T_1$ și $T_2$ care pot fi influențate de mișcarea prin încăpere a persoanei, bistabilul va continua să alimenteze releul.



La ieșirea din cameră se produc următoarele procese: deschizînd ușa se închide $I_2$ și apoi $I_1$. Prin $I_2$ se alimentează releul, iar $I_1$ restabilește legătura fotodetectorului cu bistabilul, permițînd comandarea celui din urmă. Persoana iese și închide ușa pe dinafară. Se deschide $I_1$ și apoi $I_2$. Deschiderea lui $I_1$ se face în situația cînd $T_1$ este iluminat, $T_2$ conduce, tensiunea pe baza lui $T_2$ este mică (fiind și el în conducție), iar $T_4$ și $T_5$ sînt blocate. Această stare a bistabilului va persista și după deschiderea lui $I_1$. Cînd se deschide și $I_2$ (o fracțiune de secundă mai tîrziu) releul nu mai este alimentat și în cameră becul se stinge. Am revenit la situația inițială.

Montajul se alimentează de la un redresor capabil să debiteze 12 V/200 mA și se închide într-o cutie izolată. El poate fi amplasat în afara camerei respective dacă acolo există vapori de apă.

La punerea în funcțiune se face reglajul sensibilității. Becul va fi aprins, $I_1$ închis, iar $I_2$ deschis. În această situație se mișcă cursorul potențiometrului dinspre masă spre colectorul lui $T_2$ pînă în momentul în care releul anclanșează ferm. Sensibilitatea maximă a montajului permite acționarea lui cu un bec de 60 W de la aproximativ 3 metri.

Legarea contactului $K$ al releului în instalația de iluminat se va face după schema din figura 159. În circuit se introduce și un comutator manual tip cumpănă, cu două clape: $K_1$

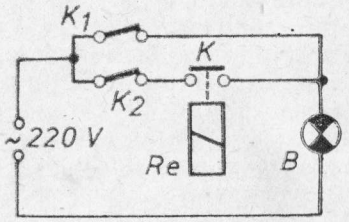



Fig. 159 — Schema instalației electrice a camerei.

permite aprinderea permanentă a becului, iar $K_1$ și $K_2$ deschise simultan întrerup iluminatul, indiferent de starea releului. Aceste acționări manuale sînt utile pentru suprimarea funcționării automatului cînd circulația mai multor persoane pe ușă perturbă funcționarea corectă a montajului.

## INDICATOARE DE NIVEL PENTRU LICHIDE

În instalațiile unde se lucrează cu lichide este nevoie să se urmărească nivelul acestora în rezervoare și, în funcție de el, să se ia anumite decizii. Să dăm cîteva exemple. Nivelul apei din rezervorul instalației locale de alimentare cu apă a unei gospodării este urmărit permanent pentru a ști momentul cînd acest rezervor trebuie umplut din nou. În cazanele pentru încălzirea apei, nivelul acesteia nu are voie să coboare sub o anumită valoare deoarece se poate deteriora cazanul. La autovehicule, cunoașterea momentului cînd nivelul lichidului de frînă sau al celui pentru spălarea parbrizului a scăzut mult, previne un posibil accident. În asemenea cazuri, urmărirea automată și semnalizarea atingerii unui anumit nivel prezintă o utilitate evidentă.

Aceste funcții pot fi realizate cu un releu fotoelectric. Metoda are avantajul că nu utilizează contacte electrice care se corodează cu timpul și provoacă defecțiuni. Sînt mai multe soluții care pot fi aplicate, folosind reflexia pe suprafața lichidului, absorbția sau refracția în lichid și altele. În continuare vom prezenta o metodă foarte simplă și accesibilă de sesizare a nivelului unui lichid. Principiul de funcționare al traductorului fotoelectric este următorul: un corp opac plutește pe suprafața lichidului; într-o anumită poziție prestabilită, el se interpune între o sursă de lumină și un element fotosensibil. Acesta sesizează micșorarea fluxului luminos datorită prezenței plutitorului și, printr-un amplificator, acționează un releu.

În figura 160a este prezentată o soluție constructivă pentru urmărirea nivelului într-un recipient. Acestuia i se atașează un tub de nivel din sticlă. Dacă este vorba de un vas



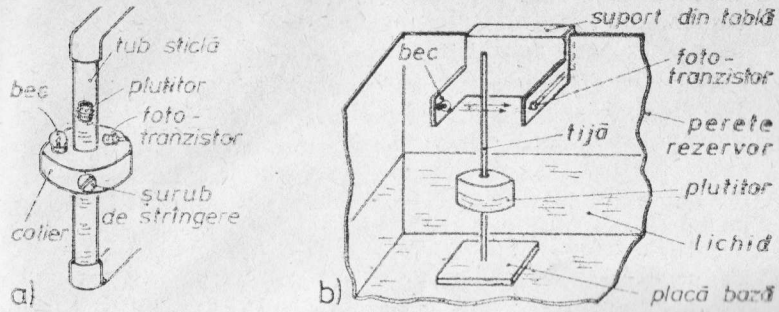



Fig. 160 — Traductoare cu plutitor pentru nivelul lichidelor: a) cu tub de nivel; b) într-un rezervor deschis.

ce conține lichid la o presiune diferită de cea atmosferică, el se racordează cu tubul la ambele capete, ca în figură. Dacă recipientul este deschis, nu este necesară decît legătura de la capătul inferior. În ambele cazuri avem de-a face cu două vase comunicante în care nivelul lichidului va fi același. Noi vom sesiza nivelul în tub, cu ajutorul unui plutitor cilindric (de pildă, un dop de plută). Un colier de lemn sau material plastic se poate fixa pe tub, la orice nivel, cu un șurub. Strîngerea va fi moderată și se va interpune o foaie de cauciuc între tub și șurub pentru a nu se sparge sticla. Colierul are fixate pe el un bec de lanternă și un fototranzistor. Este clar că plutitorul întrerupe lumina pe care o primește fototranzistorul atunci cînd nivelul lichidului are o anumită valoare.

Figura 160b înfățișează o altă schemă de amplasare a acestor elemente. Ea este aplicabilă la rezervoarele deschise în partea superioară și nu necesită instalarea unui tub de nivel. Un plutitor cilindric se mișcă vertical urmărind nivelul lichidului. Ghidarea este asigurată de o tijă pe care plutitorul gliscază. Cînd rezervorul se umple, plutitorul întrerupe fluxul luminos trimis de bec spre fototranzistor. Această soluție constructivă se utilizează pentru sesizarea unor nivele maxime, nefiind permisă imersarea în lichid a fototranzistorului și a becului.

Să vedem cum poate fi folosit semnalul electric furnizat de fototranzistor.

Figura 161a este schema unui amplificator cu două tranzistoare ce anclanșează releul atunci cînd $T_1$ este iluminat. Folosit împreună cu montura din figura 160a, releul va acționa prin contactul normal deschis o sonerie de alarmă atunci cînd plutitorul a părăsit poziția prestabilită, deci nivelul lichidului s-a modificat față de valoarea optimă. Împreună cu montura din figura 160 b, montajul poate servi la oprirea

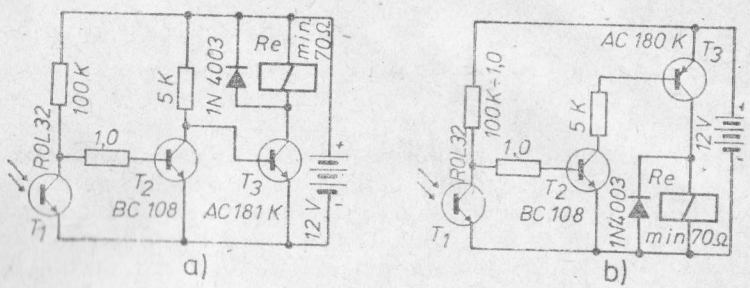



Fig. 161 Montaje electronice pentru traductoare: releul anclanșează la iluminarea fototranzistorului (a) sau la dispariția iluminării (b).

automată a accesului lichidului într-un rezervor cînd acesta s-a umplut. Atît timp cît plutitorul se află mai jos decît fototranzistorul, releul acționează o pompă sau electrovalvă prin care lichidul intră în rezervor. Cînd s-a atins nivelul maxim, $T_1$ este umbrit și releul declanșează, întrerupînd curentul.

Schema din figura 161 b are o funcționare inversă față de cea anterioară. Releul anclanșează atunci cînd $T_1$ este umbrit de plutitor. Contactul său normal deschis va acționa o sonerie sau un bec de alarmă cînd s-a atins un nivel prestabilit al lichidului.

Ambele scheme sînt suficient de sensibile pentru a fi acționate de lumina unui bec de 3,5 V/0,2 A situat la 10 cm distanță. La montajul din figura 161 b este posibilă o modificare a sensibilității prin schimbarea valorii rezistorului de



colector al lui $T_1$, între 0,1 și 1 MΩ. Becul este situat la distanța de 5, respectiv 15 cm cu aceste valori.

Se recomandă lăcuirea terminalelor și lipiturilor la fototranzistor, pentru a îmbunătăți izolația, lucru necesar în mediul umed în care el lucrează.

## AUTOMAT FOTOELECTRIC PENTRU UMPLEREA UNUI REZERVOR

Este frecventă situația în care un rezervor situat la înălțime furnizează, prin cădere, apa în instalația unei gospodării, șantier sau locuință. Periodic, rezervorul se golește și trebuie pornită o pompă electrică de alimentare, pînă la umplerea lui completă. Această operație poate fi automatizată scutind în felul acesta omul de o supraveghere permanentă a nivelului apei.

Se va descrie un sistem fotoelectric de sesizare a nivelului în rezervor (fig. 162). Un plutitor este situat pe apă, fiind legat cu o contragreutate aflată în exterior, printr-o sfoară ce trece peste doi scripeți. Masa contragreutății se alege în așa fel încît să întindă bine sfoara, dar să nu ridice plutitorul de pe apă. Cînd nivelul lichidului este minim contragreutatea atinge înălțimea maximă, iar atunci cînd rezervorul

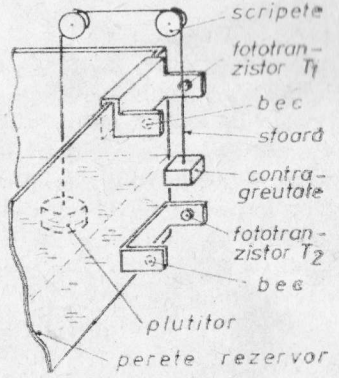



Fig. 162 — Traductorul automatului.

este complet plin ea coboară la cota cea mai de jos. La aceste două nivele extreme pe care le atinge contragreutatea în deplasarea ei, se amplasează cîte un bec și un fototranzistor pe niște suporți avînd forma din desen. Lumina fiecărui bec ajunge la suprafața fotosensibilă a tranzistorului situat pe același suport. Însă atunci cînd contragreutatea se interpune în drumul fasciculului luminos, fototranzistorul respectiv va fi umbrit. Funcționarea traductoarelor este analogă cu a indicatoarelor de nivel descrise anterior.

Prelucrarea semnalelor electrice date de fototranzistoarele $T_1$ și $T_2$ se face cu un montaj electronic a cărui schemă-bloc este dată în figura 163. Prin intermediul cîte unui etaj

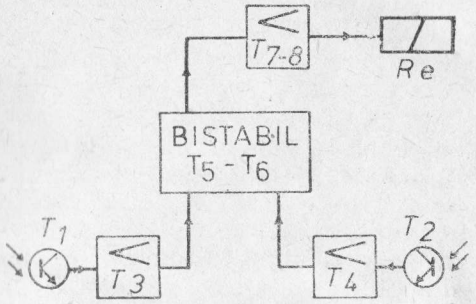



Fig. 163 — Schema-bloc a montajului electronic.

de amplificare, $T_1$ și $T_2$ comandă un circuit bistabil, făcîndu-l să basculeze dintr-o stare stabilă în alta. Un amplificator de curent continuu este conectat la ieșirea bistabilului și alimentează releul *Re* al cărui contact normal deschis este introdus în circuitul electric al pompei de apă.

Privind schema din figura 164, să analizăm în detaliu funcționarea montajului. Presupunem că inițial $T_5$ conduce, iar $T_6$ este blocat (numim această situație „starea A" a bistabilului). Ca urmare, tensiunea pe colectorul lui $T_5$ este neglijabilă, iar $T_7$ și $T_8$ nu conduc. Releul nu primește curent, deci pompa nu funcționează. Nivelul apei în rezervor este undeva între minim și maxim (intermediar). Ambele foto-



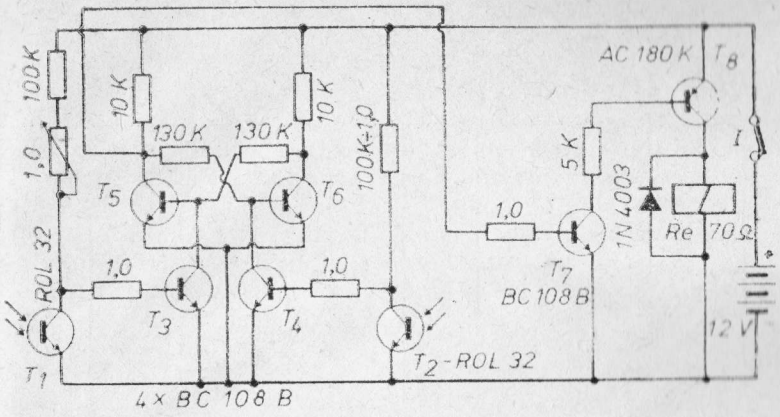



Fig. 164 — Schema de principiu a automatului.

tranzistoare primesc lumină și conduc. Tranzistoarele $T_3$ și $T_4$ sînt blocate și nu exercită nici o influență asupra bistabilului.

Datorită consumului, nivelul apei scade. Cînd plutitorul ajunge jos, contragreutatea obturează $T_1$ care se blochează, deschizîndu-l pe $T_3$. Ca urmare, baza lui $T_5$ este pusă la masă și acest tranzistor se blochează, iar $T_6$ intră în conducție. Vom numi această stare „starea B" a bistabilului. Acum tensiunea pe colectorul lui $T_5$ este mare și, în consecință, $T_7$ și $T_8$ conduc. Releul este anclanșat, motorul pompei pornește și nivelul apei începe să crească. Fototranzistorul $T_1$ va fi din nou iluminat, dar bistabilul rămîne în starea B atunci cînd $T_3$ se blochează. Deci releul continuă să fie alimentat și rezervorul se umple în continuare. Cînd se atinge nivelul maxim, $T_2$ este obturat și se blochează; $T_4$ conduce și pune la masă baza lui $T_6$. Bistabilul trece în starea A, releul declanșează, iar motorul se oprește. Acum nivelul apei poate să scadă, pentru că, deși $T_2$ va fi din nou iluminat, bistabilul rămîne în starea A. Observăm că am ajuns la situația inițială și fenomenele se vor desfășura de aici înainte în aceeași succesiune.

Tabelul 9 rezumă cele spuse mai sus. Cu 1 s-a notat starea de conducție a tranzistoarelor sau releul anclanșat, iar cu 0 starea blocată (releul declanșat).

| Nivel apă | Tendință | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | Stare bistabil | Stare releu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a) intermediar | scade | 1 | 1 | 0 | 0 | A | 0 |
| b) inferior | | 0 | 1 | 1 | 0 | A→B | 0→1 |
| c) intermediar | crește | 1 | 1 | 0 | 0 | B | 1 |
| d) superior | | 1 | 0 | 0 | 1 | B→A | 1→0 |
| a) intermediar | scade | 1 | 1 | 0 | 0 | A | 0 |

*TABELUL 9.* Funcționarea automatului pentru umplerea unui rezervor.

Becurile folosite cu 3,5 V/0,2 A. Valoarea rezistoarelor de colector ale lui $T_1$ și $T_2$ determină sensibilitatea montajului. Pentru 100 k Ω, becul poate fi așezat la maximum 3 cm, iar pentru 1 M Ω, la circa 10 cm de fototranzistor. Potențiometrul din colectorul lui $T_1$ servește și la echilibrarea celor două etaje de intrare ale montajului pentru ca sensibilitatea lor la lumină să fie aceeași.

La montare se vor lua măsuri de protecție împotriva umidității. Se va acoperi ansamblul de traductoare cu o carcasă ce nu permite pătrunderea luminii exterioare.

## FOTORELEU SENSIBIL LA SENSUL DEPLASĂRII

Releele fotoelectrice a căror funcționare se bazează pe micșorarea fluxului luminos primit de un singur fotodetector, datorită trecerii unui corp opac, nu pot sesiza sensul mișcării acestuia. Există însă multe situații în care ne interesează sensul deplasării obiectului. Un caz tipic este releul fotoelectric montat la ușa unei încăperi. Este foarte util ca el să acționeze doar la intrarea unei persoane în cameră, fără a



reacționa la ieșirea pe această ușă. În acest mod se poate produce un semnal sonor de avertizare numai la intrarea unui nou-venit fără ca el să fie acționat (inutil și chiar supărător) la ieșirea unei persoane din încăpere.

Schema-bloc a releului sensibil la sensul deplasării este dată în figura 165. Se observă folosirea a două fascicule luminoase și două fototranzistoare. $T_2$ este urmat de un lanț de amplificare și orice umbrire a lui duce la anclanșarea

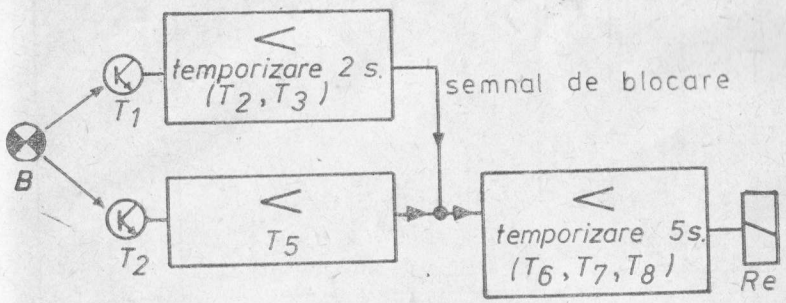



Fig. 165 — Schema-bloc a releului sensibil la sensul deplasării.

releului electromagnetic pentru minimum 5 secunde (alarmare). $T_1$ este element fotosensibil al unui etaj ce blochează comanda de alarmare trimisă de $T_2$. Mai exact, cînd $T_1$ este umbrit se întrerupe legătura între amplificatoare, iar umbrirea lui $T_2$ nu mai provoacă alarmarea. În plus, această blocare persistă circa 2 secunde după ce a încetat umbrirea lui $T_1$, lucru care-și va dovedi utilitatea în secvența de funcționare pe care o descriem mai jos.

În figura 166a sînt schițate situațiile ce apar la trecerea unui obiect prin fața fotodetectoarelor, în sensul care este sesizat de releu. În starea inițială (I) ambele fototranzistoare primesc lumină. Obiectul deplasîndu-se, umbrește mai întîi pe $T_2$ (II). Se anclanșează releul *Re*, care rămîne în această stare încă 5 secunde după ce obiectul, în mișcarea lui, um-

bresțe în continuare fototranzistorul de blocare $T_1$ (III, IV). Cînd obiectul a trecut, se revine la situația inițială (V, identică cu I). La 2 secunde după iluminarea lui $T_1$ încetează acțiunea de blocare a comenzii de alarmare și montajul poate sesiza trecerea unui alt corp.

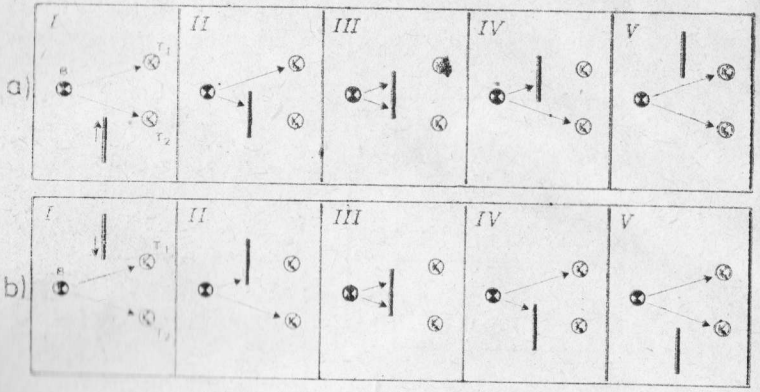



Fig. 166 — Mișcarea unui obiect în sensul care produce acționarea releului (a) și în sensul care nu este sesizat (b).

Să vedem ce se întîmplă cînd un obiect pătrunde în calea fasciculului de lumină mișcîndu-se în sens invers (fig. 166b). Din situația inițială (I) se trece la starea în care $T_1$ este umbrit (II). Astfel se blochează comanda de alarmare pe care o va trimite $T_2$ în momentul cînd va fi umbrit și el (III); deci releul nu anclanșează. Deplasîndu-se în continuare, obiectul umbrește la un moment dat doar pe $T_2$ (IV). În acest caz s-ar produce anclanșarea releului, dacă acțiunea de blocare a etajului comandat de $T_1$ nu ar persista încă 2 secunde după trecerea umbrei peste acest fototranzistor. Deci, dacă obiectul părăsește spațiul respectiv în interval de 2 secunde de la iluminarea lui $T_1$, releul nu va fi acționat. În final se ajunge la situația V, identică cu cea inițială.



Releul este pregătit pentru un nou ciclu din cele descrise mai sus.

Schema fotoreleului este dată în figura 167. În situația inițială, ambele fototranzistoare sînt iluminate, deci tensiunea lor emitor-colector este foarte mică, insuficientă pentru a deschide tranzistoarele $T_3$ și $T_5$ cu care sînt cuplate. $T_3$ fiind blocat, determină blocarea lui $T_4$; ca urmare capacitorul $C_1$ este încărcat la 12 V. Baza lui $T_6$ este conectată între două tranzistoare blocate, deci curentul prin ea este practic nul, iar $T_6$ este blocat la rîndul său. Capacitorul $C_2$ este încărcat la 12 V, tranzistoarele $T_7$ și $T_8$ nu conduc, iar releul *Re* nu este alimentat.

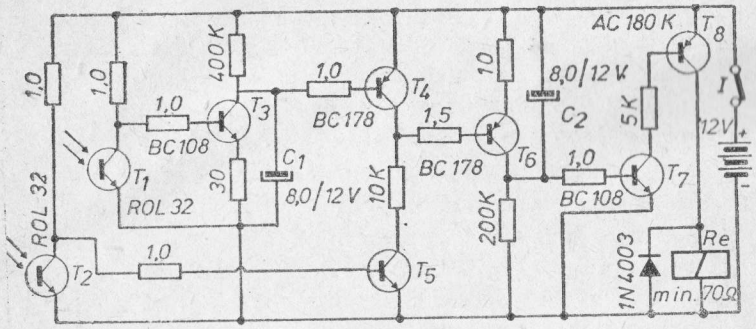



Fig. 167 — Schema releului sensibil la sensul deplasării.

Dacă $T_2$ este umbrit, el se blochează, tensiunea sa de colector crește, iar $T_5$ intră în conducție. Presupunem că $T_4$ este blocat. Deci baza lui $T_6$ va fi practic conectată la masă și $T_6$ conduce. Prin el se descarcă rapid $C_2$, iar $T_7$ și $T_8$ intră în conducție și releul anclanșează. Să remarcăm faptul că este suficientă umbrirea lui $T_2$ numai o fracțiune de secundă, pentru ca releul să rămînă anclanșat 5 secunde. Temporizarea aceasta este introdusă de $C_2$ care, odată descărcat, are nevoie de timp pentru a se încărca din nou, prin rezistorul de colector al lui $T_6$. În tot acest interval, baza lui $T_7$ este la un

potențial suficient de ridicat pentru ca acest tranzistor să fie deschis.

Vom analiza în continuare felul în care $T_1$ reușește să blocheze semnalul de alarmare. Prin umbrirea lui $T_1$ crește tensiunea pe colectorul său și $T_3$ se deschide. Prin el se descarcă $C_1$, iar $T_4$ este adus în stare de conducție. Tranzistorul $T_4$ conectează însă baza lui $T_6$ la plusul sursei de alimentare. Astfel $T_6$ nu mai poate fi introdus în conducție prin deschiderea lui $T_5$. Acțiunea lui $T_4$ de blocare a tranzistorului $T_6$ durează încă 2 secunde după iluminarea lui $T_1$, constantă de timp datorată lui $C_1$ care se încarcă prin rezistorul de colector al lui $T_3$.

Cititorul poate deduce acum ușor funcționarea montajului în oricare din situațiile prezentate în figura 166.

Pentru a sesiza sensul deplasării pe orizontală a obiectelor este evident că fototranzistoarele $T_1$ și $T_2$ trebuie amplasate unul lîngă altul, pe orizontală, orientate spre sursa de lumină. Distanța dintre ele determină gama de viteze admisibile pentru corpurile ce urmează a fi sesizate. În exemplul considerat la început, al unor persoane care trec prin fața unor senzori, se poate alege distanța de 10 cm. În acest fel montajul va funcționa corect pentru orice viteză cuprinsă între 30 km/h și ...200 m/h. La viteze mai mari, $C_2$ nu are timp să se descarce suficient încît reîncărcarea lui — deci semnalizarea — să dureze măcar o secundă, interval considerat minim ca să fie eficientă o sonerie acționată de contactele releului. Viteza minimă este limitată de timpul de 2 secunde cît persistă blocarea alarmei; în acest interval corpul trebuie să părăsească spațiul dintre fascicule.

Sensibilitatea montajului permite acționarea lui cu un bec de 3,5 V/0,2 A de la distanța de circa 1 m. Fasciculele sînt formate prin proiectarea imaginii filamentului pe fototranzistoare, cu ajutorul a două lentile convergente de 25 mm diametru și 10 cm distanță focală. Se poate folosi un bec



de 60 W, fără nici o lentilă. De asemenea, montajul funcționează bine și cu lumina indirectă a soarelui.

În toate cazurile se va urmări ca umbrele pe care le produce corpul în mișcare pe fototranzistoare să fie suficient de nete (fără zonă mare de penumbră).

## SEMNALIZATOR FOTOELECTRIC PENTRU APARATELE DE MĂSURĂ

Majoritatea aparatelor de măsură au un ac indicator care, deplasîndu-se în fața unei scale gradate, indică valoarea mărimii respective. Există astfel de aparate pentru măsurarea deplasărilor mici (comparatoare), a forței (dinamometre), presiunii atmosferice (barometre), presiunii (manometre), umidității (higrometre), temperaturii (termometre), turației (turometre), tensiunii electrice (voltmetre), curentului (ampermetre), puterii electrice (wattmetre) și multe altele.

Montajul descris în continuare servește la semnalizarea atingerii de către acul indicator a unei anumite valori (prestabilite) de pe scala oricărui aparat. Sesizarea poziției acului se face fotoelectric, astfel că metoda are avantajul de a nu perturba cu nimic funcționarea sistemului mecanic al aparatului, care de cele mai multe ori este foarte sensibil.

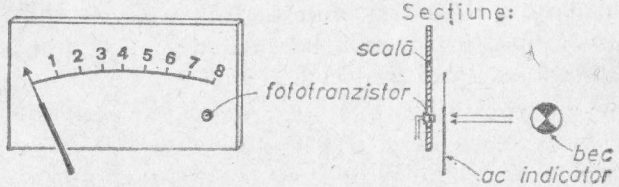



Fig. 168 — Dispunerea elementelor principale ale semnalizatorului.

Principiul de funcționare este următorul: un element fotosensibil este fixat pe scala aparatului la valoarea dorită și este iluminat continuu de un bec (fig. 168). Cînd acul indicator trece prin valoarea respectivă, el se interpune în calea luminii și umbrește elementul fotosensibil. Un montaj electronic sesizează această atenuare a luminii și acționează un releu ce execută semnalizarea sau o comandă de automatizare. Un exemplu de utilizare practică a circuitului este deconectarea automată a multimetrului folosit la măsurători atunci cînd acul depășește capătul scalei și poate să se ardă aparatul de măsură.

Schema electronică trebuie să permită acționarea releului indiferent de viteza cu care acul trece prin fața fotodetectorului. De aceea s-a ales configurația din figura 169. Semnalul electric furnizat de fototranzistorul $T_1$ comandă un trigger Schmitt. Acest circuit transformă o variație lentă a

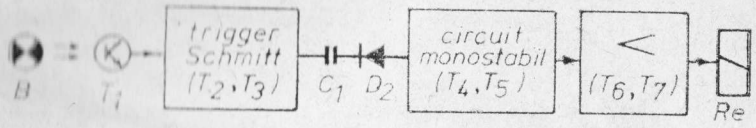



Fig. 169 — Schema-bloc a semnalizatorului.

tensiunii de la intrare într-un salt brusc la ieșire. Deci el rezolvă problema vitezelor mici de deplasare a acului indicator: chiar dacă lumina este obturată foarte lent, există un moment cînd triggerul basculează brusc. În clipa aceea prin capacitorul $C_1$ se transmite un impuls negativ de tensiune care, prin $D_2$, comandă bascularea unui circuit monostabil. După un timp $T$ acesta revine în starea lui fundamentală. În acest interval, printr-un amplificator de curent continuu, este anclanșat releul *Re*. Monostabilul rezolvă problema vitezelor foarte mari de trecere a acului prin fața lui $T_1$: dacă nu ar exista el, releul nu ar avea timp să atingă armătura în cîteva milisecunde cît durează obturarea luminii. Dar, prin monostabil, acest timp este prelungit la cîteva zecimi de secundă ($T = 0{,}5$ s) și releul anclanșează ferm. Un contact de automenținere poate asigura apoi alimentarea releului pe un timp oricît de lung.



Schema electrică este dată în figura 170. Cînd $T_1$ primește lumină, tensiunea pe colectorul său este mică, deci $T_2$ va fi blocat, iar $T_3$ conduce. Monostabilul se găsește în starea lui fundamentală: $T_4$ conduce, iar $T_5$ este blocat. Tensiunea pe colectorul lui $T_5$ este +9 V, iar $T_6$, avînd emitorul la aceeași tensiune, este blocat. Tranzistorul $T_7$ și releul *Re* nu sînt parcurse de curenți semnificativi.

Să urmărim fenomenele care se produc în momentul obturării luminii incidente de către acul în mișcare. În figura

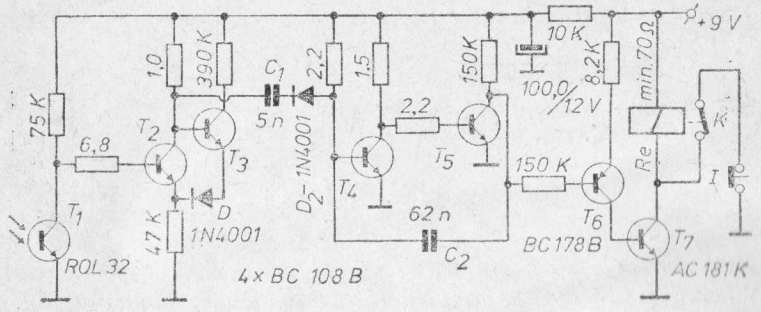
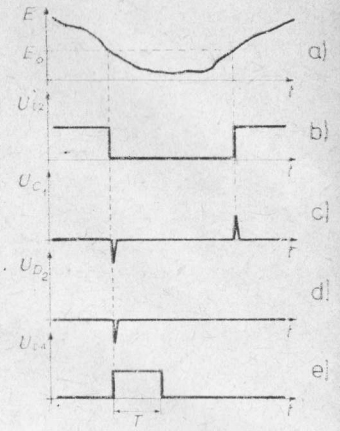



Fig. 170 — Schema semnalizatorului pentru aparatele de măsură.

171 sînt prezentate graficele evoluției în timp a unor mărimi; ele ne vor ajuta la înțelegerea funcționării. Nivelul de iluminare $E$ al lui $T_1$ scade datorită umbririi sale de către ac. În figura 171a este reprezentată o variație lentă a acestei mărimi. Cînd nivelul iluminării scade sub o anumită valoare $E_0$, tensiunea pe baza lui $T_2$ a ajuns suficient de mare ca să provoace bascularea triggerului: $T_2$ intră brusc în conducție, iar $T_3$ se blochează. Pe colectorul lui $T_2$ tensiunea scade

Fig. 171 — Diagrame de variație a iluminării și tensiunii.




(fig. 171b). Un impuls negativ este transmis prin $C_1$ (fig. 171c). El trece prin $D_2$ (fig. 171d) și blochează pe $T_4$, provocînd creșterea tensiunii lui de colector (fig. 171e). Implicit, $T_6$ conduce și monostabilul trece în starea instabilă, de unde revine la cea inițială după scurgerea intervalului de timp $T$. În această perioadă tranzistoarele $T_6$ și $T_7$, comandate de $T_5$, conduc, iar releul anclanșează. El închide contactul $K$ prin care își asigură automenținerea în poziția anclanșat. După ce acul a trecut prin fața fototranzistorului, nivelul de iluminare crește peste $E_0$, triggerul basculează din nou, dar impulsul pozitiv de tensiune apărut pe condensatorul $C_1$ nu este transmis mai departe de dioda $D_2$ și restul montajului rămîne neperturbat.

Cînd $Re$ este anclanșat, un alt contact normal deschis (nefigurat în desen) asigură o semnalizare optică sau acustică, ori o comandă de automatizare. În exemplul dat anterior, al protecției unui multimetru, se va utiliza un contact normal închis al releului care, la anclanșare, deschide circuitul de măsură și protejează astfel aparatul.

Odată acționat, releul trebuie declanșat manual, printr-o scurtă apăsare pe întrerupătorul $I$. Se deschide circuitul de automenținere și armătura mobilă este eliberată.



Dacă se dorește doar o semnalizare de scurtă durată, se va renunța la contactul de automenținere a releului. El nu va anclanșa decît pe intervalul $T$. Această constantă de timp a monostabilului poate fi crescută prin mărirea capacității lui $C_2$. Pentru 25 $\mu$F se obțin timpi de peste un minut. Evident, în acest caz $C_2$ va fi un capacitor electrolitic, de bună calitate, montat cu plusul la colectorul lui $T_5$.

În final cîteva indicații constructive. Fototranzistorul poate să fie fixat definitiv într-o gaură practicată în scala aparatului sau se va monta pe o glisieră ce-i permite deplasarea în dreptul oricărei diviziuni a scalei. Sursa de lumină este un bec de 3,8 V/0,07 A situat la 2—3 cm distanță de fototranzistor, sau orice altă sursă „punctuală" capabilă să asigure circa 250 lx pe $T_1$. O iluminare mai puternică nu este necesară, deoarece mărește timpul de comutare al montajului. Lățimea acului indicator trebuie să fie de minim 1 mm pentru a obtura suficient lumina.

*ANEXA 1*

# DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE ROMÂNEȘTI

## I. DISPOZITIVE FOTOSENSIBILE CU SILICIU

### CELULE FOTOVOLTAICE

| Tip | Sensibilitate | Aria fotosensibilă | Fototensiune la $E = 1$ klx | Timp de răspuns | Capsula |
|---|---|---|---|---|---|
| | μA/klx | mm² | mV | μs | |
| ROL 11 | 80 | 13 | 400 | 10 | Fig. 172a |
| ROL 011 | 100 | 13 | 400 | 10 | Fig. 172b |
| ROL 12 | 160 | 28 | 400 | 20 | Fig. 172c |
| ROL 16* | 80 | 16 | 400 | 10 | Fig. 172d |

* Celulă fotovoltaică cu răspuns mărit în albastru

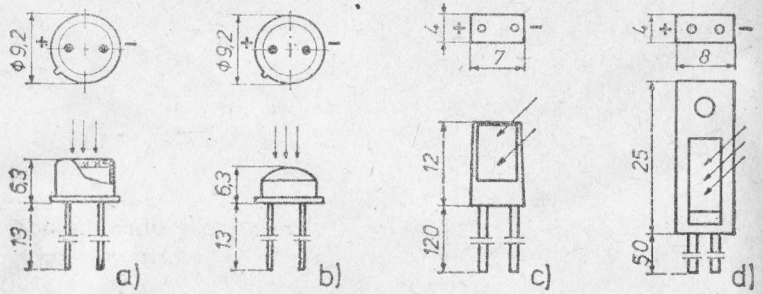



Fig. 172 — Tipuri de capsule pentru celulele fotovoltaice.



### CELULE SOLARE

| Tip | Fotocurent la 80 mW/cm² | Fototensiune la 80 mW/cm² | Randament de conversie | Capsula |
|---|---|---|---|---|
| | mA | mV | % | |
| ROL 41 | 90 | 500 | 12 | Fig. 173b |
| ROL 45 | 90 | 4 500 | 12 | Fig. 173a |

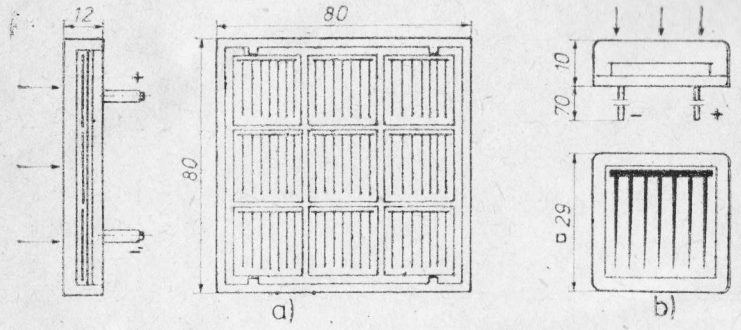



Fig. 173 — Capsule pentru module de celule solare (a) și celule solare (b).

### FOTODIODE

| Tip | Sensibilitate | Tensiune inversă | Curent de întuneric | Timp de răspuns | Capsula |
|---|---|---|---|---|---|
| | μA/klx | V | nA | μs | |
| Rol 21 | 30 | 75 | 20 | 1 | Fig. 174b |
| ROL 021 | 30 | 50 | 20 | 1 | Fig. 174c |
| ROL 22 | 7 | 70 | 20 | 1 | Fig. 174a |

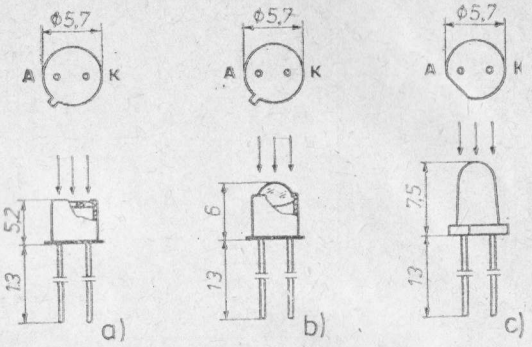



Fig. 174 — Tipuri de capsule pentru fotodiode: a) cu fereastră plană; b) cu lentilă de sticlă; c) din plastic.

FOTOTRANZISTOARE

| Tip | Sensibilitate | $V_{CE\ max}$ | Timp de răspuns | Acces bază | Capsula |
|---|---|---|---|---|---|
| | mA/klx | V | μs | | |
| ROL 31 | 10 | 30 | 8 | nu | Fig. 175b |
| ROL 031 | 12 | 30 | 8 | nu | Fig. 175c |
| ROL 32 | 0,5 | 30 | 8 | nu | Fig. 175a |
| ROL 33 A | 16 | 30 | 4 | da | Fig. 175b |
| ROL 33 B | 10 | 30 | 4 | da | Fig. 175b |
| ROL 33 C | 5 | 30 | 4 | da | Fig. 175b |
| ROL 033A | 18 | 30 | 4 | da | Fig. 175c |
| ROL 033B | 10 | 30 | 4 | da | Fig. 175c |
| ROL 34 A | 2 | 30 | 4 | da | Fig. 175a |
| ROL 34 B | 0,5 | 30 | 4 | da | Fig. 175a |



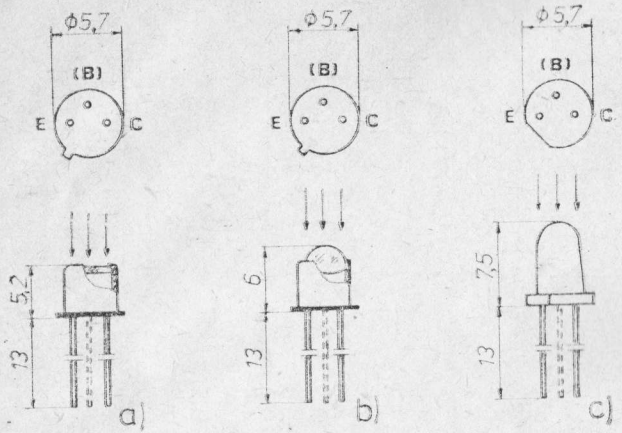



Fig. 175 — Tipuri de capsule pentru fototranzistoare: a) cu fereastră plană; b) cu lentilă de sticlă; c) din plastic.

## II. DISPOZITIVE FOTOEMISIVE CU GaAsP

DIODE ELECTROLUMINESCENTE (LED)

| Tip | Culoare | Intensitate luminoasă | Curent nominal | Timp de răspuns | Capsula |
|---|---|---|---|---|---|
| | | med | mA | ns | |
| ROL 02 | roșu | 0,6 | 20 | 15 | Fig. 176a |
| ROL 05 | portocaliu | 2 | 20 | | Fig. 176a |
| ROL 07 | galben | 2 | 20 | | Fig. 176a |
| ROL 09 | verde | 0,6 | 20 | | Fig. 176a |

AFIŞOARE NUMERICE CU LED-uri

| Tip | Număr de cifre | Înălțimea cifrei | Curent pe segment | Capsula |
|---|---|---|---|---|
| | | mm | mA | |
| ROL 77 | 1 | 7,6 | 20 | Fig. 176b |
| ROL 81 | 9 | 2,8 | 1 | Fig. 176c |

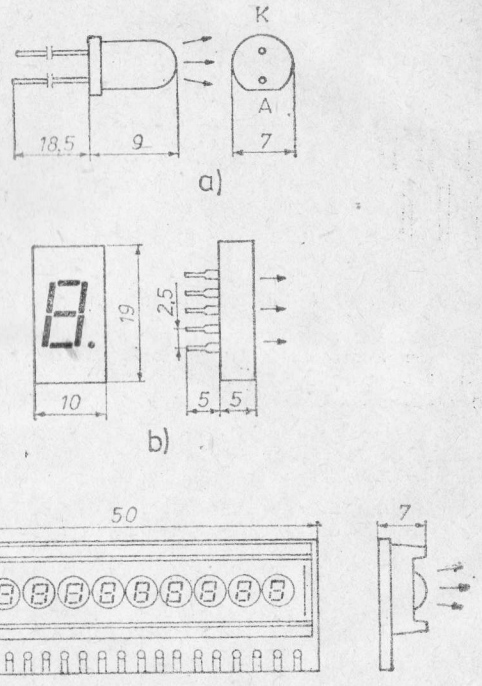



Fig. 176 — Tipuri de capsule pentru dispozitivele emisive: a) LED-uri; b) afișor cu o singură cifră (un digit); c) afișor cu mai multe cifre (multidigit).



III. DISPOZITIVE MIXTE

CUPLOR OPTIC

| Tip | Elemente componente | Curent maxim intrare | $V_{CE\ max}$ | $R_{izolație}$ | Factor de transfer | Capsulă |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | mA | V | ohmi | | |
| ROL 61 | LED + fototranzistor | 20 | 30 | $10^{11}$ | 15 | Fig. 177 |

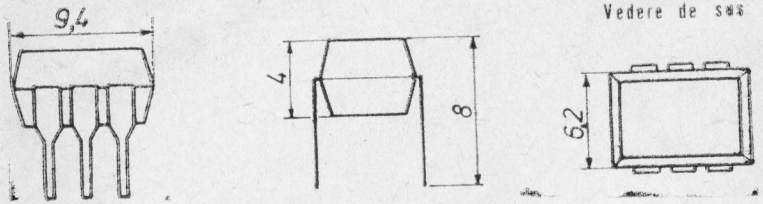



Fig. 177 — Capsula cuplorului optic.

Notă — Dispozitivele optoelectronice prezentate se produc la Centrul de Cercetare Științifică și Inginerie Tehnologică pentru Semiconductoare (I.C.C.E.) — București.

CUPRINS


INTRODUCERE ..... V

PRIVIRE RETROSPECTIVĂ ..... 1

EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN ..... 12

Celula fotoelectrică ..... 19
Fotomultiplicatorul ..... 23

EFECTUL FOTOELECTRIC INTERN — SEMICONDUCTOARE ..... 27

Conductibilitatea metalelor ..... 27
Conductibilitatea semiconductoarelor ..... 30
Efectul fotoelectric intern ..... 37
Fotorezistorul ..... 43

ELEMENTE DE FIZICA SEMICONDUCTOARELOR ..... 48

Benzi energetice în corpul solid ..... 48
Concentrația purtătorilor de sarcină ..... 54
Recombinarea purtătorilor de sarcină ..... 59
Joncțiunea P-N ..... 62
Absorbția luminii în semiconductoare ..... 65

TEHNOLOGII DE REALIZARE A JONCȚIUNILOR SEMICONDUCTOARE ..... 72

Alierea ..... 72
Difuzia impurităților ..... 73
Contacte ohmice ..... 76
Tehnologia planară ..... 77

NOȚIUNI DE FIZICA DISPOZITIVELOR ELECTRONICE SEMICONDUCTOARE ..... 80

Dioda semiconductoare ..... 80
*Polarizarea inversă* ..... 80
*Polarizarea directă* ..... 82
Tranzistorul cu joncțiuni ..... 84

DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE SEMICONDUCTOARE ACTIVE BAZATE PE ABSORBȚIA LUMINII ..... 91

Celula fotovoltaică ..... 92
Celula solară ..... 100
Fotodioda ..... 107
Fototranzistorul ..... 116
Fototiristorul ..... 121

DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE SEMICONDUCTOARE EMISIVE ..... 125

Dioda electroluminescentă ..... 126
Dioda laser ..... 134
Cuplorul optic ..... 141

NOȚIUNI DE FOTOMETRIE ȘI RADIOMETRIE ..... 146

Fotometrie ..... 146
Radiometrie ..... 149

APLICAȚII ALE DISPOZITIVELOR OPTOELECTRONICE SEMICONDUCTOARE ..... 152

Probleme generale ..... 152
Montaje propuse ..... 159
*Reglajul optoelectronic al volumului sonor* ..... 159
*Exponometru fotoelectric* ..... 161
*Traductor unghiular* ..... 165
*Alimentatoare solare fotovoltaice* ..... 170
*Afișor numeric* ..... 173
*Indicatoare optice de tensiune* ..... 177
*Automat pentru oprirea magnetofonului* ..... 180
*Semnalizator pentru corespondență* ..... 183
*Lampă automată de poziție* ..... 185



*Cifru fotoelectric* ..... 187
*Numărător fotoelectric* ..... 191
*Avertizor pentru lanternele și stopurile autoturismului* ..... 194
*Automat pentru aprinderea luminii în timpul nopții* ..... 198
*Indicator pentru maneta de viteze* ..... 200
*Telecomandă cu lumină* ..... 204
*Automat de expunere la măririle fotografice* ..... 207
*Tir cu lumină* ..... 210
*Comanda automată a luminii într-o cameră* ..... 214
*Indicatoare de nivel pentru lichide* ..... 218
*Automat fotoelectric pentru umplerea unui rezervor* ..... 221
*Fotoreleu sensibil la sensul deplasării* ..... 224
*Semnalizator fotoelectric pentru aparatele de măsură* ..... 229

Anexa 1 — Dispozitive optoelectronice românești ..... 234

Bibliografie ..... 241